

## Capitolo VI

### Temi d'esame risolti

#### Indice

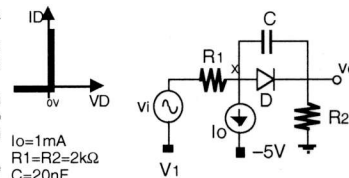
17 Novembre 1999 - (esonero A).....	2
17 Novembre 1999 - (esonero B).....	8
16 Dicembre 1999 - (esonero).....	14
12 Gennaio 2000.....	21
26 Gennaio 2000.....	25
23 Febbraio 2000.....	30
7 Aprile 2000.....	36
8 Giugno 2000.....	42
28 Giugno 2000.....	48
25 Luglio 2000.....	54
13 Settembre 2000.....	60

## Soluzioni

### Esercizio 1

Nel circuito in figura il diodo e' ideale e ha la caratteristica mostrata in figura.

- 1- Per  $V_1=1V$ , si valuti il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $V_o/V_i$ .
- 2- Per  $V_1=3V$ , si valuti il punto di lavoro, la funzione di trasferimento  $V_o/V_i$  e se ne traccino i diagrammi di Bode
- 3- Per  $V_1=3V$ , si calcoli il valore massimo della corrente  $I_o$  perche' il diodo sia acceso.



1-

Si supponga il diodo spento. Allora si ha subito che:

$$V_x = V_1 - I_o R_1 = -1V$$

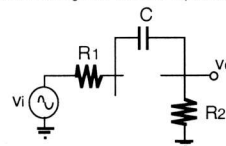
Nel diodo (in quanto spento) non passa corrente e pertanto:

$$V_o = 0V$$

L'ipotesi di diodo spento e' verificata dal fatto che

$$V_D = V_x - V_o = -1$$

Per valutare il guadagno  $v_o/v_i$  si disegna il circuito equivalente di piccolo segnale:



Il guadagno si scrive quindi come partizione:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sC} + R_2} = \frac{sC R_2}{1 + sC(R_1 + R_2)}$$

2- Si supponga nuovamente il diodo spento. Allora si ha subito che:

$$V_x = V_1 - I_o R_1 = 2V$$

Nel diodo (in quanto spento) non passa corrente e pertanto:

$$V_o = 0V$$

La condizione di diodo spento e' allora falsa in quanto si ottiene:

$$V_D = V_x - V_o = 2V$$

Ne risulta che il diodo e' acceso. Pertanto si ha che  $V_x = V_o$ . Si scrive allora la legge di Kirchhoff per le correnti continue al nodo X e si ottiene:

$$I_{R1} = I_o + I_D$$

Esplicitando i termini si ottiene:

$$\frac{V_1 - V_o}{R_1} = I_o + \frac{V_o}{R_2}$$

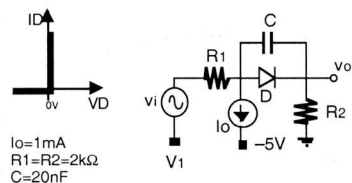
## Prova di Esonero (Compito A)

17 Novembre 1999 - (esonero A)

### Esercizio 1

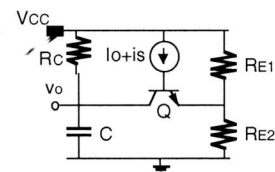
Nel circuito in figura il diodo e' ideale e ha la caratteristica mostrata in figura.

- 1- Per  $V_1=1V$ , si valuti il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $V_o/V_i$ .
- 2- Per  $V_1=3V$ , si valuti il punto di lavoro, la funzione di trasferimento  $V_o/V_i$  e se ne traccino i diagrammi di Bode
- 3- Per  $V_1=3V$ , si calcoli il valore massimo della corrente  $I_o$  perche' il diodo sia acceso.



### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto operativo;
- 2- Si valuti il guadagno di transimpedenza  $v_o/i_s$ ;
- 3- Si tracci l'evoluzione di  $v_o(t)$  in risposta ad un gradino di corrente in ingresso di  $0.1\mu A$
- 4- Si dimensionino  $R_{E2}$  in modo che l'emettitore si porti in polarizzazione a  $2V$



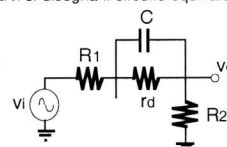
Da questa si ricava la tensione  $V_o$  come:

$$V_o = \frac{V_1 - R_1 I_o}{1 + \frac{R_1}{R_2}} = 0.5V$$

La corrente sul diodo e su  $R_2$  e':

$$I_D = \frac{V_o}{R_2} = 0.25mA$$

Per valutare il guadagno  $v_o/v_i$  si disegna il circuito equivalente di piccolo segnale:



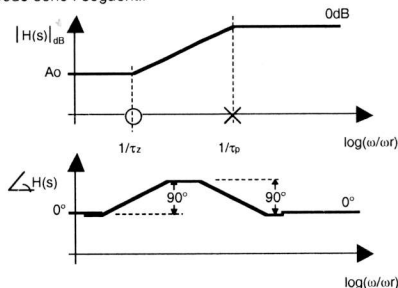
ove  $r_d$  e' la resistenza differenziale del diodo data da:

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{25mV}{0.25mA} = 100\Omega$$

Il guadagno si scrive quindi come partizione:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_2}{R_1 + \frac{r_d}{1 + s r_d C} + R_2} = \frac{R_2 (1 + s r_d C)}{R_1 + R_2 + r_d + s C r_d (R_1 + R_2)}$$

Si hanno un polo ed uno zero. La pulsazione del polo e' maggiore di quella dello zero. I diagrammi di Bode sono i seguenti:



con:

$$\tau_z = r_d C$$

$$\tau_p = R_1 + R_2 + r_d$$

$$A_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + r_d}$$

Si scrive allora la legge di Kirchoff per le correnti continue al nodo X e si ottiene:

$$I_{R1} = I_0 + I_D$$

Explicitando i termini si ottiene:

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} = I_0 + \frac{V_0}{R_2}$$

Il diodo e' acceso quando la sua corrente  $I_D$  e' diversa da zero il che accade per  $V_0 > 0$ . Utilizzando l'espressione di  $V_0$  ricavata al punto 2, cioe' quando il diodo e' acceso si puo' scrivere:

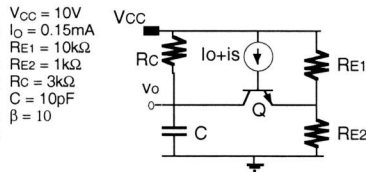
$$V_0 = \frac{V_1 - R_1 \cdot I_0}{1 + \frac{R_1}{R_2}} > 0V$$

Da cio' si ricava che deve essere:

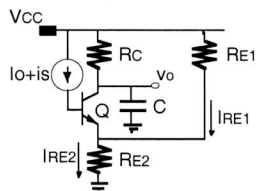
$$I_0 < \frac{V_1}{R_1} = 1.5mA$$

## Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto operativo;
- 2- Si valuti il guadagno di transimpedenza  $v_o/i_s$ ;
- 3- Si tracci l'evoluzione di  $v_o(t)$  in risposta ad un gradino di corrente in ingresso di  $0.1mA$
- 4- Si dimensionino  $R_{E2}$  in modo che l'emettitore si porti in polarizzazione a  $2V$



- 1- Il circuito puo' essere ridisegnato nel seguente modo



Per la polarizzazione si ignora il contributo di corrente di segnale  $i_s$ . La corrente di base e' data da  $I_0$ :

$$I_B = I_0 = 0.15mA$$

La corrente di collettore e di emettitore risultano quindi essere:

$$I_C = \beta \cdot I_B = 1.5mA$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 1.65mA$$

Per calcolare la tensione sull'emettitore e' necessario scrivere la legge di Kirchoff delle correnti al nodo di emettitore che e':

$$I_E + I_{RE1} = I_{RE2}$$

Sostituendo le espressioni delle tre correnti si ottiene:

$$I_E + \frac{V_{CC} - V_E}{R_{E1}} = \frac{V_E}{R_{E2}}$$

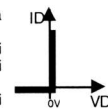
# Prova di Esonero (Compito B)

17 Novembre 1999 - (esonero B)

## Esercizio 1

Nel circuito in figura il diodo e' ideale e ha la caratteristica mostrata in figura.

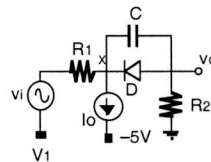
- 1- Per  $V_1=1V$ , si valuti il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $V_o/V_i$ .
- 2- Per  $V_1=3V$ , si valuti il punto di lavoro, la funzione di trasferimento  $V_o/V_i$  e se ne traccino i diagrammi di Bode
- 3- Per  $V_1=3V$ , si calcoli il valore minimo della corrente  $I_0$  perche' il diodo sia acceso.



$$I_0 = 1mA$$

$$R_1 = R_2 = 2k\Omega$$

$$C = 20nF$$



## Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto operativo;
- 2- Si valuti il guadagno di transimpedenza  $v_o/i_s$ ;
- 3- Si tracci l'evoluzione di  $v_o(t)$  in risposta ad un gradino di corrente in ingresso di  $0.1mA$
- 4- Si dimensionino  $R_C$  in modo da massimizzare la dinamica in uscita

$$V_{CC} = 5V$$

$$I_0 = 0.5mA$$

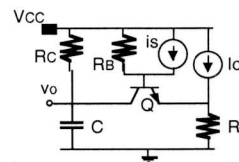
$$R_E = 1k\Omega$$

$$R_B = 35.4k\Omega$$

$$R_C = 3k\Omega$$

$$C = 10pF$$

$$\beta = 10$$



Da cui si ricava  $V_E$

$$V_E = \frac{V_{CC} + I_E \cdot R_{E1}}{1 + \frac{R_{E1}}{R_{E2}}} = 2.40909$$

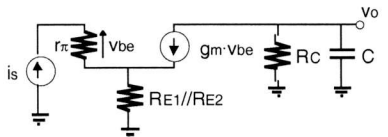
La tensione di base e'

$$V_B = V_E + 0.7V = 3.10909$$

La tensione di collettore e':

$$V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 5.5V$$

Si verifica quindi che il transistor non e' in saturazione. Si passa quindi al circuito equivalente per piccolo segnale, che e' il seguente



La tensione di segnale  $v_{be}$  e' data da:

$$v_{be} = i_s \cdot r_\pi$$

La corrente sul carico  $R_C/C$  e' quindi  $g_m \cdot v_{be}$  e la tensione di uscita:

$$v_o = -g_m \cdot v_{be} \cdot R_C / C = -g_m \cdot i_s \cdot r_\pi \cdot \frac{R_C}{1 + s \cdot R_C \cdot C} = -\beta \cdot \frac{R_C}{1 + s \cdot R_C \cdot C} \cdot i_s$$

Nell'ultima equazione si e' sfruttata l'uguaglianza  $g_m \cdot r_\pi = \beta$ .

Il guadagno di transimpedenza e' quindi:

$$\frac{v_o}{i_s} = -\beta \cdot \frac{R_C}{1 + s \cdot R_C \cdot C} = -\frac{A_o}{1 + s \cdot \tau}$$

con

$$A_o = \beta \cdot R_C = 30k\Omega$$

$$\tau = R_C \cdot C$$

3- Un gradino di  $0.1\mu A$  in ingresso ha trasformata di Laplace

$$I_n(s) = \frac{0.1 \cdot 10^{-6}}{s}$$

L'uscita nel dominio s si scrive come:

$$Out(s) = -\frac{A_o}{1 + s \cdot \tau} \cdot \frac{0.1 \cdot 10^{-6}}{s} = -\frac{0.1 \cdot 10^{-6}}{s} \cdot \frac{A_o}{1 + s \cdot \tau}$$

Antitrasformando si ottiene:

$$V_o(t) = -A_o \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) = -0.3V \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$

4-

La tensione sull'emettitore si puo' scrivere come:

$$V_E = \left(I_E + \frac{V_{CC} - V_E}{R_{E1}}\right) \cdot R_{E2}$$

Risolviendo l'equazione per  $V_E$  si ricava:

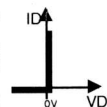
$$R_{E2} = \frac{V_E}{I_E + \frac{V_{CC} - V_E}{R_{E1}}} = 816.3 \Omega$$

## Soluzioni

### Esercizio 1

Nel circuito in figura il diodo e' ideale e ha la caratteristica mostrata in figura.

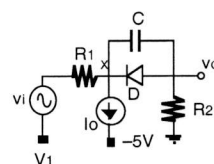
- 1- Per  $V_1=1V$ , si valuti il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $V_o/V_i$ .
- 2- Per  $V_1=3V$ , si valuti il punto di lavoro, la funzione di trasferimento  $V_o/V_i$  e se ne traccino i diagrammi di Bode
- 3- Per  $V_1=3V$ , si calcoli il valore minimo della corrente  $I_0$  perche' il diodo sia acceso.



$$I_0 = 1mA$$

$$R_1 = R_2 = 2k\Omega$$

$$C = 20nF$$



1-

Si supponga il diodo spento. Allora non passa corrente nel diodo e  $I_0$  passa tutta su  $R_1$ . La tensione su  $V_X$  si porta quindi a:

$$V_X = V_1 - R_1 \cdot I_0 = -1V$$

Sul diodo cade  $V_D = 1V$  e quindi e' errata l'ipotesi di diodo spento. Il diodo e' allora acceso e opera da corto circuito ( $V_X = V_0$ ). Si ha quindi che:

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} + \frac{-V_0}{R_2} = I_0$$

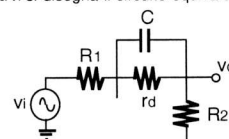
Si ricava quindi che:

$$V_0 = -0.5V$$

La corrente sul diodo  $I_D$  e' data da:

$$I_D = \frac{0V - (-0.5V)}{R_2} = 0.25mA$$

Per valutare il guadagno  $v_o/v_i$  si disegna il circuito equivalente di piccolo segnale:



ove  $r_d$  e' la resistenza differenziale del diodo data da:

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{25mV}{0.25mA} = 100\Omega$$

Il guadagno si scrive quindi come partizione:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_2}{R_1 + \frac{r_d}{1 + s \cdot r_d \cdot C} + R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + r_d + s \cdot R_2 \cdot r_d \cdot C}$$

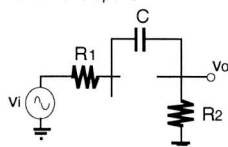
$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_2 (1 + s \cdot r_d \cdot C)}{R_1 + R_2 + r_d + s \cdot R_2 \cdot r_d \cdot C} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + r_d} \cdot \frac{1 + s \cdot r_d \cdot C}{1 + s \cdot \frac{R_2 \cdot r_d \cdot C}{R_1 + R_2 + r_d}}$$

2- Si supponga il diodo spento. Allora si ha subito che:

$$V_X = V_1 - I_0 \cdot R_1 = 1V$$

Cio' verifica l'ipotesi di diodo spento.

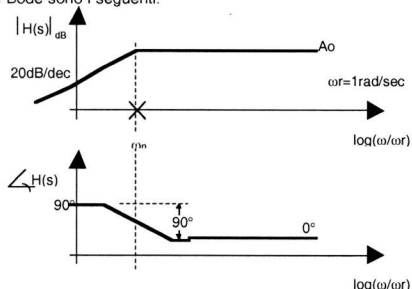
Per valutare il guadagno  $v_o/v_i$  si disegna il circuito equivalente di piccolo segnale ove il diodo spento corrisponde ad un circuito aperto.



Il guadagno si scrive quindi come partizione:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sC} + R_2} = \frac{sC \cdot R_2}{1 + sC \cdot (R_1 + R_2)}$$

I diagrammi di Bode sono i seguenti:



con:

$$\omega_p = \frac{1}{C \cdot (R_1 + R_2)}$$

$$A_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

3-

Si scrive allora la legge di Kirchhoff per le correnti continue al nodo X e si ottiene:

$$I_{R1} + I_o = I_o$$

Esplicitando i termini si ottiene:

$$\frac{V_1 - V_o}{R_1} + \frac{0V - V_o}{R_2} = I_o$$

Il diodo e' acceso quando la sua corrente  $I_D$  e' diversa da zero il che accade per  $V_o < 0$ . Ricavando l'espressione di  $V_o$ , si puo' definire quando il diodo e' acceso e si puo' scrivere:

$$V_o = \frac{V_1 - R_1 \cdot I_o}{1 + \frac{R_1}{R_2}} < 0V$$

Da cio' si ricava che deve essere:

$$r_{\pi} = \frac{V_T}{I_B} = 305 \Omega \quad g_m = \frac{I_C}{V_T} = 32.75 \text{ mA/V}$$

Si puo' scrivere:

$$v_b = \left( i_s - \frac{v_b - v_e}{r_{\pi}} \right) \cdot R_B$$

$$v_e = \left( \frac{v_b - v_e}{r_{\pi}} + g_m \cdot (v_b - v_e) \right) \cdot R_E$$

Risolviendo per  $v_b$  e  $v_e$  si puo' ricavare

$$v_{be} = \frac{i_s \cdot R_B \cdot r_{\pi}}{R_B + R_E + r_{\pi} + g_m \cdot R_E \cdot r_{\pi}}$$

La corrente sul carico  $R_C/C$  e' quindi  $g_m v_{be}$  e la tensione di uscita:

$$v_o = -g_m v_{be} R_C / C = -g_m \cdot \frac{i_s \cdot R_B \cdot r_{\pi}}{R_B + R_E + r_{\pi} + g_m \cdot R_E \cdot r_{\pi}} \cdot \frac{R_C}{1 + s \cdot R_C \cdot C}$$

Il guadagno di transimpedenza e' quindi:

$$\frac{v_o}{i_s} = - \frac{g_m \cdot R_B \cdot r_{\pi}}{R_B + R_E + r_{\pi} + g_m \cdot R_E \cdot r_{\pi}} \cdot \frac{R_C}{1 + s \cdot R_C \cdot C} = - \frac{A_o}{1 + s \cdot \tau}$$

con

$$A_o = \frac{g_m \cdot R_B \cdot r_{\pi} \cdot R_C}{R_B + R_E + r_{\pi} + g_m \cdot R_E \cdot r_{\pi}} = 22738 \Omega$$

3- Un gradino di  $0.1 \mu A$  in ingresso ha trasformata di Laplace

$$I_n(s) = \frac{0.1 \cdot 10^{-6}}{s}$$

L'uscita nel dominio s si scrive come:

$$Out(s) = - \frac{A_o}{1 + s \cdot \tau} = - \frac{0.1 \cdot 10^{-6}}{s}$$

Antitrasformando si ottiene:

$$V_o(t) = -A_o \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) = -0.22V \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$$

4-

La dinamica in uscita, supponendo la base fissa in tensione ed assumendo  $V_{CEsat} = 0.7V$  e' limitata verso l'alto dall'alimentazione (5V), mentre verso il basso dalla polarizzazione della base (2.1V).

La massima ampiezza e' quindi  $5 - 2.1 = 2.9V$ . Per poter elaborare un segnale di questa ampiezza si deve polarizzare il circuito in modo che il punto di lavoro del nodo di uscita sia a meta' di questa escursione.

Si deve quindi fissare:

$$V_o = V_B + \frac{2.9V}{2} = 3.55V$$

Per fare cio' si puo' cambiare la resistenza sul collettore. Sapendo che vale la relazione:

$$V_o = V_{CC} - I_C \cdot R_C, R_C \text{ si calcola come:}$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_o}{I_C} = 1.79 \text{ k}\Omega$$

Questa variazione comporta che venga modificato anche il valore del guadagno di transconduttanza.

$$I_o > \frac{V_1}{R_1} = 1.5 \text{ mA}$$

## Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto operativo;
- 2- Si valuti il guadagno di transimpedenza  $v_o/i_s$ ;
- 3- Si tracci l'evoluzione di  $v_o(t)$  in risposta ad un gradino di corrente in ingresso di  $0.1 \mu A$
- 4- Si dimensiona  $R_C$  in modo da massimizzare la dinamica in uscita

$$V_{CC} = 5V$$

$$I_o = 0.5 \text{ mA}$$

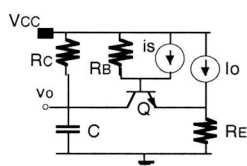
$$R_E = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = 35.4 \text{ k}\Omega$$

$$R_C = 3 \text{ k}\Omega$$

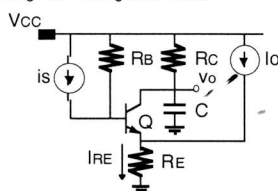
$$C = 10 \text{ pF}$$

$$\beta = 10$$



1-

Il circuito puo' essere ridisegnato nel seguente modo



Per la polarizzazione si ignora il contributo di corrente di segnale  $i_s$ .

Assumendo il transistor operante in regione attiva ( $V_{BE} \approx 0.7V$ ) si puo' scrivere l'equazione:

$$V_{CC} = R_B I_B + V_{BE} + (I_E + I_o) \cdot R_E$$

Essendo  $I_E = (\beta + 1) \cdot I_B$ , si puo' sostituire e risolvere l'equazione precedente in  $I_B$  ottenendo:

$$I_B = 81.9 \mu A$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 0.9 \text{ mA}$$

$$V_E = (I_E + I_o) \cdot R_E = 1.4 \text{ V}$$

$$V_B = V_{BE} + V_E = 2.1 \text{ V}$$

La corrente di collettore e':

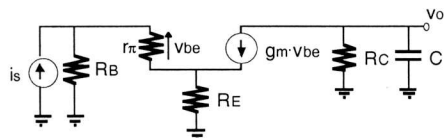
$$I_C = \beta \cdot I_B = 0.81 \text{ mA}$$

La tensione di collettore risulta essere:

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 2.54V$$

Si verifica quindi che il transistor non e' in saturazione.

Si passa quindi al circuito equivalente per piccolo segnale, che e' il seguente



I parametri sono:

## Prova di Esonero

16 Dicembre 1999 - (esonero)

### Esercizio 1

- 1- Si valuti il punto di lavoro;
- 2- Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$ ;

$$V_{DD} = 5V$$

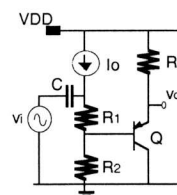
$$I_o = 1 \text{ mA}$$

$$R_1 = R_2 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = \infty$$

$$C = \infty$$



### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto operativo;
- 2- Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$  e se ne traccino i diagrammi di Bode

$$V_{DD} = 5V$$

$$V_B = 3.5V$$

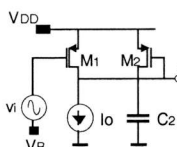
$$V_{TH} = -1.2V$$

$$I_o = 6 \text{ mA}$$

$$k_1 = 10 \text{ mA/V}^2$$

$$k_2 = 20 \text{ mA/V}^2$$

$$C_2 = 20 \text{ pF}$$



### Esercizio 3

Nel circuito in figura l'amplificatore operazionale e' ideale.

- 1- Si valuti il punto operativo;
- 2- Si valuti il guadagno di transimpedenza  $v_o/i_s$ ;
- 3- Si dimensiona  $I_o$  in modo che l'uscita si porti a 0V in continua.
- 4- Si valuti l'effetto di un offset dell'amplificatore operazionale di 10mV.

$$V_B = 4V$$

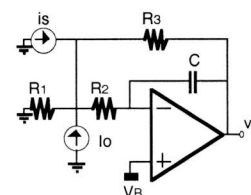
$$I_o = 1 \text{ mA}$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 30 \text{ k}\Omega$$

$$C = 10 \text{ pF}$$

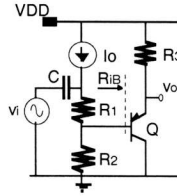


## Soluzioni

### Esercizio 1

- 1 - Si valuti il punto di lavoro;  $V_{DD}=5V$
- 2 - Si calcoli  $R_{IB}$ ;
- 3 - Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$ ;
- 4 - Per  $R_2=0$ , si valuti il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$ ;

$$\begin{aligned} I_O &= 1mA \\ R_1 &= R_2 = 2k\Omega \\ R_3 &= 2k\Omega \\ \beta &= 10 \\ C &\Rightarrow \infty \end{aligned}$$



- 1 - Si scrive l'equazione di Kirchoff al nodo di base del circuito:

$$I_O + I_B = I_{R2} \Rightarrow I_O + \frac{V_{DD} - (V_B + V_{EB})}{R_3} = \frac{V_B}{1 + \beta} = \frac{V_B}{R_2}$$

Da cui si ricava:

$$V_B = \frac{R_2 \cdot ((1 + \beta) \cdot I_O \cdot R_3 - V_{EB} + V_{DD})}{R_2 + R_3 + \beta \cdot R_3} = 2.19167V$$

Da cui si ottiene:

$$I_{R2} = \frac{V_B}{R_2} = 1.0958mA$$

Per differenza la corrente di base risulta essere:

$$I_B = 1.0958mA - 1mA = 95.8\mu A$$

Assumendo che  $V_{EB}=0.7V$ , la tensione e la corrente di emettitore sono quindi:

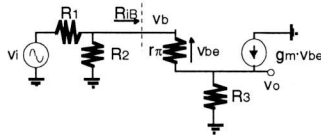
$$V_E = V_B + V_{EB} = 2.89167V$$

$$I_E = \frac{V_{DD} - V_E}{R_3} = 1.054mA$$

- 2 - La resistenza che si 'vede' in base e' data da:

$$R_{IB} = r_{\pi} + \beta \cdot R_3 = \frac{\beta \cdot V_T}{I_B} = 20.261k\Omega$$

- 3 - Il circuito equivalente per il piccolo segnale e' il seguente.



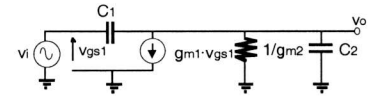
Per il calcolo del guadagno si puo' sfruttare il risultato del punto 2.

Il guadagno si puo' scrivere come:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_b} \cdot \frac{v_b}{v_i}$$

Il termine  $\frac{v_o}{v_b}$  corrisponde al guadagno di un iniettore di emettitore che e':

$$\frac{v_o}{v_b} = \frac{g_m \cdot R_3}{1 + g_m \cdot R_3}$$



Visto che  $v_{gs1}=v_i$ , si scrive allora l'equazione di Kirchoff al nodo di uscita:

$$s \cdot C_1 \cdot (v_i - v_o) = g_{m1} \cdot v_i + g_{m2} \cdot v_o + s \cdot C_2 \cdot v_o$$

Si ottiene:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_{m1} - s \cdot C_1}{g_{m2} + s \cdot (C_1 + C_2)} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \cdot \frac{1 - s \cdot C_1/g_{m1}}{1 + s \cdot (C_1 + C_2)/g_{m2}}$$

con:

$$g_{m1} = \sqrt{k_1 \cdot I_{M1}} = 3mA/V$$

$$g_{m2} = \sqrt{k_2 \cdot I_{M2}} = 4.69mA/V$$

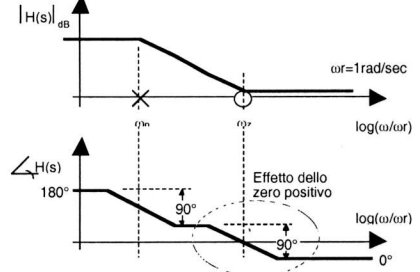
La funzione di trasferimento ha un polo ed uno zero:

$$\omega_p = -g_{m2}/C_1 + C_2 = -156.35Mrad/sec$$

$$\omega_z = g_{m1}/C_1 = 300Mrad/sec$$

Attenzione che lo zero ha segno positivo. Cio comporta che avra' stesso comportamento in ampiezza di uno zero con segno negativo, mentre avra' comportamento opposto a quello con segno negativo per la fase.

I diagrammi di Bode saranno quindi (essendo  $\omega_p < \omega_z$ )



- 3 - Il guadagno in continua e':

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}}$$

ove

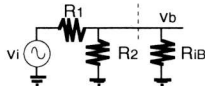
$$g_{m1} = 2 \cdot k_1 \cdot (V_{GS1} - V_{TH}) = 2 \cdot k_1 \cdot ((V_{DD} - V_B) - V_{TH})$$

$$g_{m2} = \sqrt{k_2 \cdot I_{M2}} = \sqrt{k_2 \cdot (I_O - I_{M1})} = \sqrt{k_2 \cdot (I_O - (k_1 \cdot ((V_{DD} - V_B) - V_{TH})^2))}$$

Per avere

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} = -1$$

Per calcolare  $\frac{v_b}{v_i}$  si puo' analizzare il seguente schema semplificato.



Il guadagno si puo' allora scrivere come:

$$\frac{v_b}{v_i} = \frac{R_{IB}/R_2}{R_1 + R_{IB}/R_2}$$

In totale si ottiene:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_b} \cdot \frac{v_b}{v_i} = \frac{R_{IB}/R_2}{R_1 + R_{IB}/R_2} \cdot \frac{g_m \cdot R_3}{1 + g_m \cdot R_3} = 0.470346$$

- 4 - Per  $R_2=0$ , la base viene collegata direttamente a massa. La corrente di emettitore e':

$$I_E = \frac{V_{DD} - V_{EB}}{R_3} = 2.15mA$$

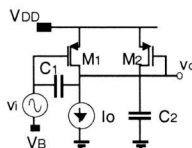
Per cio' che riguarda il segnale, il fatto che la base sia direttamente collegata a massa fa si che non ci sia un cammino tra ingresso e uscita. Il guadagno risulta quindi:

$$\frac{v_o}{v_i} = 0$$

### Esercizio 2

- 1 - Si valuti il punto operativo;  $V_{DD} = 5V$
- 2 - Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$  e se ne traccino i diagrammi di Bode (attenzione ai segni di poli e zeri)
- 3 - Si dimensiona  $V_B$  in modo che lo stadio abbia guadagno -1 in continua

$$\begin{aligned} V_{DD} &= 5V \\ V_B &= 3.5V \\ V_{TH} &= -1.2V \\ I_O &= 2mA \\ k_1 &= 10mA/V^2 \\ k_2 &= 20mA/V^2 \\ C_1 &= 10pF \\ C_2 &= 20pF \end{aligned}$$



- 1 - Si suppone M1 in saturazione. La corrente di M1 e' allora:

$$I_{M1} = k_1 \cdot (V_{GS1} - V_{TH})^2 = k_1 \cdot ((V_{DD} - V_B) - V_{TH})^2 = 0.9mA$$

La corrente nel transistor M2 e' allora data da:

$$I_{M2} = I_O - I_{M1} = 1.1mA$$

Essendo connesso 'a diodo', il transistor M2 opera in saturazione. La tensione  $V_{GS2}$  e' allora:

$$V_{GS2} = V_{TH} + \sqrt{\frac{I_{M2}}{k_2}} = 1.4345V$$

Quindi la polarizzazione di  $V_O$  e':

$$V_O = 5V - 1.4345V = 3.5655V$$

- 2 - Il circuito equivalente di piccolo segnale e' il seguente:

si deve imporre:

$$g_{m1} = g_{m2}$$

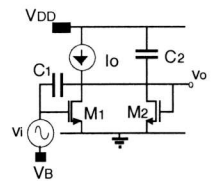
$$2 \cdot k_1 \cdot ((V_{DD} - V_B) - V_{TH}) = 2 \cdot \sqrt{k_2 \cdot (I_O - (k_1 \cdot ((V_{DD} - V_B) - V_{TH})^2))}$$

Cio' si ottiene per:

$$V_B = 3.4348V$$

### Esercizio 2 - B

- 1 - Si valuti il punto operativo;  $V_{DD} = 5V$
- 2 - Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$  e se ne traccino i diagrammi di Bode (attenzione ai segni di poli e zeri)
- 3 - Si dimensiona  $V_B$  in modo che lo stadio abbia guadagno -1 in continua



- 1 -

$$I_{M1} = k_1 \cdot (V_{GS1} - V_{TH})^2 = k_1 \cdot ((V_{DD} - V_B) - V_{TH})^2 = 0.45mA$$

$$I_{M2} = I_O - I_{M1} = 1.55mA$$

$$V_{GS2} = V_{TH} + \sqrt{\frac{I_{M2}}{k_2}} = 1.3969V$$

- 2 -

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_{m1} - s \cdot C_1}{g_{m2} + s \cdot (C_1 + C_2)} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \cdot \frac{1 - s \cdot C_1/g_{m1}}{1 + s \cdot (C_1 + C_2)/g_{m2}}$$

con:

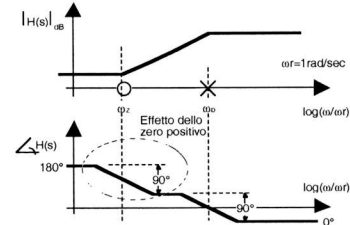
$$g_{m1} = \sqrt{k_1 \cdot I_{M1}} = 1.5mA/V$$

$$g_{m2} = \sqrt{k_2 \cdot I_{M2}} = 7.874mA/V$$

La funzione di trasferimento ha un polo ed uno zero:

$$\omega_p = -g_{m2}/C_1 + C_2 = -262.47Mrad/sec$$

$$\omega_z = g_{m1}/C_1 = 150Mrad/sec$$



- 3 -

$$V_B = 1.79628V$$

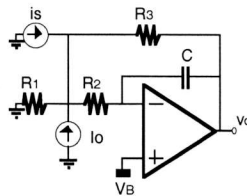


### Esercizio 3

Nel circuito in figura l'amplificatore operazionale e' ideale.

- 1- Si valuti il punto operativo;
- 2- Si valuti il guadagno di transimpedenza  $v_o/i_s$ ;
- 3- Si dimensionino  $I_o$  in modo che l'uscita si porti a 0V in continua.
- 4- Si valuti l'effetto di un offset dell'amplificatore operazionale di 10mV.

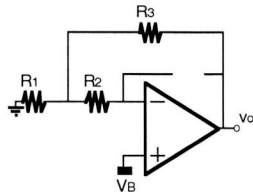
$$\begin{aligned} V_B &= 4V \\ I_o &= 1mA \\ R_1 &= 10k\Omega \\ R_2 &= 10k\Omega \\ R_3 &= 30k\Omega \\ C &= 10pF \end{aligned}$$



- 1 - Per il calcolo del punto di lavoro si ignora il condensatore. Si hanno due generatori ( $I_o$  e  $V_B$ ) e si puo' applicare il principio di sovrapposizione degli effetti che si esprime come:

$$V_o = V_o(V_B \neq 0, I_o = 0) + V_o(V_B = 0, I_o \neq 0)$$

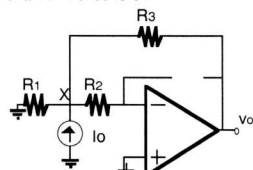
Dapprima si applica solo  $V_B$  e si annulla  $I_o$ . Il circuito e':



Su  $R_2$  non scorre corrente. La struttura e' quindi non-invertente e il guadagno di  $V_B$  verso l'uscita e':

$$V_o(V_B \neq 0, I_o = 0) = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \cdot V_B = 16V$$

Dopo si applica  $I_o$  e si annulla  $V_B$ . Il circuito e':



Su  $R_2$  non scorre corrente. Il nodo X ha quindi tensione nulla. Ne consegue che anche su  $R_1$  non scorre corrente. Pertanto la corrente  $I_o$  passa tutta su  $R_3$  e l'uscita si porta a:

$$V_o(V_B = 0, I_o \neq 0) = -R_3 \cdot I_o = -30V$$

La tensione in uscita totale risulta essere data da:

$$V_o = V_o(V_B \neq 0, I_o = 0) + V_o(V_B = 0, I_o \neq 0) = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \cdot V_B - R_3 \cdot I_o = -14V$$

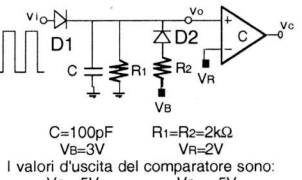
## Prova di Esame

12 Gennaio 2000

### Esercizio 1

I diodi e il comparatore in figura sono ideali. Il segnale in ingresso e' un'onda quadra che sta alta a 5V per 1μs e sta bassa a 0V per 1μs.

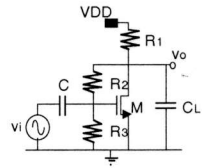
- 1- Non si consideri il condensatore C. Si tracci la forma d'onda in uscita ai nodi  $V_o$  e  $V_c$ .
- 2 - Si indichi il valore min/max di  $R_2$  per cui il comparatore non scatta mai.
- 3 - Si consideri il condensatore C e si assuma  $R_2 = 0\Omega$ : si tracci la forma d'onda in uscita ai nodi  $V_o$  e  $V_c$ .



### Esercizio 2

- 1 - Si valuti il punto operativo;
- 2 - Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$  e se ne traccino i diagrammi di Bode

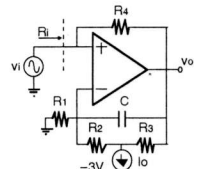
$$\begin{aligned} V_{DD} &= 5V \\ R_1 &= 1k\Omega \\ R_2 &= 1k\Omega \\ R_3 &= 3k\Omega \\ V_{TH} &= 1V \\ k &= 10mA/V^2 \\ C &= \infty \\ C_L &= 20pF \end{aligned}$$



### Esercizio 3

L' amplificatore operazionale e'  $I_o = 1mA$  ideale.

- 1- Si valuti il punto operativo e si calcoli quanta corrente fornisce l'amplificatore operazionale;
- 2- Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$ , e se ne traccino i diagrammi di Bode;
- 3- Si valuti l' impedenza d'ingresso  $R_i$



## Soluzioni

### Esercizio 1

I diodi e il comparatore in figura sono ideali. Il segnale in ingresso e' un'onda quadra che sta alta a 5V per 1μs e sta bassa a 0V per 1μs.

- 1- Non si consideri il condensatore C. Si tracci la forma d'onda in uscita ai nodi  $V_o$  e  $V_c$ .
- 2 - Si indichi il valore min/max di  $R_2$  per cui il comparatore non scatta mai.

$$\begin{aligned} C &= 100pF \\ V_B &= 3V \\ R_1 &= R_2 = 2k\Omega \\ V_R &= 2V \end{aligned}$$

I valori d'uscita del comparatore sono:

$$V_{C+} = 5V \quad V_{C-} = -5V$$

- 3 - Si consideri il condensatore C e si assuma  $R_2 = 0\Omega$ : si tracci la forma d'onda in uscita ai nodi  $V_o$  e  $V_c$ .

- 1- Quando  $V_i$  e' a 5V, il diodo  $D_1$  e' acceso e  $V_o$  si porta a 5V. Il diodo  $D_2$  risulta pertanto spento. Il nodo di ingresso positivo del comparatore si porta quindi a 5V, mentre l'ingresso negativo e' a 2V. L'uscita  $V_c$  si porta quindi a  $V_c = V_{C+} = 5V$ .

Quando  $V_i$  e' a 0V, il diodo  $D_1$  e' spento, mentre il diodo  $D_2$  e' acceso.  $V_o$  si porta quindi a:

$$V_o = V_B \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 1.5V$$

Il nodo di ingresso positivo del comparatore si porta quindi a 1.5V, mentre l'ingresso negativo e' a 2V. L'uscita  $V_c$  si porta quindi a  $V_c = V_{C-} = -5V$ .

- 2-

Quando  $V_i$  e' a 5V,  $V_o$  sara' sempre a 5V e  $V_c$  si portera' sempre a  $V_{C+}$ . Si dovra' quindi evitare che quando  $V_i$  si porta a 0V,  $V_o$  si porti ad una tensione tale da far scattare il comparatore. Cioe' si deve avere:

$$V_o > V_R \quad V_o = V_B \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} > V_R$$

Quindi si deve imporre:

$$R_2 < R_1 \cdot \left(\frac{V_B}{V_R} - 1\right) = 1k\Omega$$

- 3-

Si consideri ora l'effetto del condensatore C.

Per  $V_i = 5V$ , il diodo  $D_1$  e' acceso e opera da corto circuito. La tensione  $V_o$  viene comunque fissata da  $V_i$  ed il condensatore non ha effetto. Il condensatore per  $V_i = 5V$  si carica a 5V. Quando  $V_i$  commuta e va a 0V, il diodo  $D_1$  risulta interdetto, mentre il diodo  $D_2$  e' ancora spento. Allora il condensatore (carico inizialmente a 5V) si scarica attraverso il resistore  $R_1$  con andamento esponenziale verso 0V:

$$V_o(t) = 5V \cdot \exp(-t/(R_1 \cdot C))$$

Nell'espressione di  $V_o(t)$  si e' supposto che  $V_i$  abbia commutato da 5V a 0V all'istante  $t=0$ . L'andamento di  $V_o(t)$  segue l'espressione sopra ricavata finche' non si accende il diodo  $D_2$ . Cio' accade per  $V_o = V_B$  all'istante  $t_{sc}$  che si puo' ricavare dalla relazione:

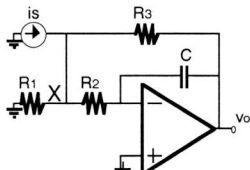
$$V_o(t_{sc}) = 5V \cdot \exp(-t_{sc}/(R_1 \cdot C)) = V_B$$

Si ricava allora  $t_{sc}$

$$t_{sc} = -R_1 \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_B}{5V}\right) = 0.10217\mu s$$

2 -

Il circuito per il segnale diventa:



Si scrivono le equazioni di Kirchhoff ai due nodi (X e la massa virtuale).

$$i_s = \frac{v_x}{R_1} + \frac{v_x - v_o}{R_3} + \frac{v_x}{R_2}$$

$$\frac{v_x}{R_2} = -s \cdot C \cdot v_o$$

Risolviendo per  $v_o$  si ottiene:

$$\frac{v_o}{i_s} = -R_3 \cdot \frac{1}{1 + s \cdot C \cdot \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1}\right)}$$

3 -

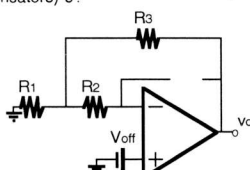
La tensione in uscita calcolata al punto 1 e':

$$V_o = V_o(V_B \neq 0, I_o = 0) + V_o(V_B = 0, I_o \neq 0) = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \cdot V_B - R_3 \cdot I_o = 0V$$

Per avere  $V_o = 0$ , si deve avere:

$$I_o = \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1}\right) \cdot V_B = 0.533mA$$

4 - La tensione di offset si puo' mettere in serie all'ingresso non-invertente dell'amplificatore. Il circuito da studiare (tenendo conto che l'offset e' in continua e non si deve considerare il condensatore) e':



L'effetto dell'offset e' quindi:

$$V_o(V_{off}) = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \cdot V_{off} = 40mV$$

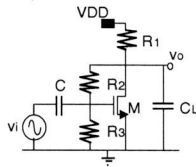
Da qui fino all'istante di scatto dell'ingresso verso 5V,  $V_o$  rimane al valore di  $V_B$  (3V). Quando poi l'ingresso ritorna a 5V anche  $V_o$  lo segue, dal momento che il diodo  $D_1$  si accende.

Da notare che in questa evoluzione di  $V_o$ ,  $V_o$  non e' mai inferiore a  $V_B$  e quindi il comparatore non scatta mai. Pertanto la sua uscita rimane sempre a  $V_{C+}$ .

### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto operativo;
- 2- Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$  e se ne traccino i diagrammi di Bode

$$\begin{aligned} V_{DD} &= 5V \\ R_1 &= 1k\Omega \\ R_2 &= 1k\Omega \\ R_3 &= 3k\Omega \\ V_{TH} &= 1V \\ k &= 10mA/V^2 \\ C &\Rightarrow \infty \\ C_L &= 20pF \end{aligned}$$



- 1- Si puo' scrivere l'equazione di Kirchoff al nodo di drain.

$$\frac{V_{DD} - V_o}{R_1} = \frac{V_o}{R_2 + R_3} + I_M$$

La corrente del transistor  $I_M$  si puo' poi scrivere come (assumendo il transistor in saturazione):

$$I_M = k(V_{GS} - V_{TH})^2 = k\left(V_o - \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_o - V_{TH}\right)^2$$

ove  $V_{GS}$  e' stato calcolato dal partitore di  $R_2$  e  $R_3$  su  $V_o$ .

Sostituendo l'espressione di  $I_M$  nell'equazione di Kirchoff e risolvendo per  $V_o$  si ottengono due valori:

$$\begin{aligned} V_{o1} &= 0.44V \\ V_{o2} &= 2V \end{aligned}$$

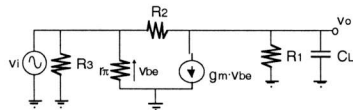
Dei due il primo non e' possibile in quanto  $V_{GS}$ , che sarebbe ancora minore di  $V_o$ , sarebbe inferiore a  $V_{TH}$  e quindi il transistor sarebbe spento. La soluzione valida e' quindi:

$$V_o = 2V$$

Da cio':

$$\begin{aligned} V_{GS} &= V_o \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 1.5V \\ I_M &= k(V_{GS} - V_{TH})^2 = 2.5mA \\ I_{R1} &= \frac{5V - 2V}{1k\Omega} = 3mA \end{aligned}$$

- 2- Il circuito equivalente per piccoli segnali e' il seguente:



con

$$g_m = 2 \cdot \frac{I_M}{V_{GS} - V_{TH}} = 2 \cdot \frac{2.5mA}{0.5V} = 10mA/V$$

Scrivendo l'equazione di Kirchoff al nodo di uscita  $v_o$  si ottiene:

$$\frac{v_i - v_o}{R_2} = g_m v_i + \frac{v_o}{R_1} + s C_L v_o$$

Risolvendo per  $v_o/v_i$  si ottiene:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 \cdot (1 - g_m R_2)}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot C_L \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

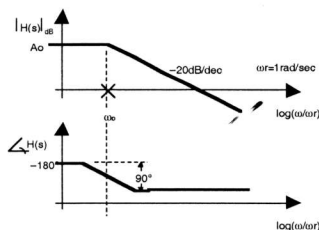
E' presente un polo a:

$$\omega_p = \frac{1}{C_L \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

Il guadagno in continua e':

$$A_o = \frac{R_1 \cdot (1 - g_m R_2)}{R_1 + R_2} = -4.5$$

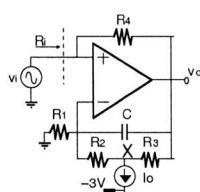
I diagrammi di Bode sono i seguenti:



### Esercizio 3

Nel circuito in figura l'amplificatore operazionale e' ideale.  $I_o = 1mA$ .  
 $R_1 = 10k\Omega$   
 $R_2 = 10k\Omega$   
 $R_3 = 30k\Omega$   
 $R_4 = 30k\Omega$   
 $C = 10pF$

- 1- Si valuti il punto operativo e si calcoli quanta corrente fornisce l'amplificatore operazionale;
- 2- Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$ , e se ne traccino i diagrammi di Bode;
- 3- Si valuti l'impedenza d'ingresso  $R_i$



- 1- Per valutare il punto operativo si spegne il generatore di segnale  $V_i$ . Cio' comporta che l'ingresso non-invertente dell'amplificatore operazionale sia a massa. Per il principio di massa virtuale anche quello invertente risulta a massa. Su  $R_1$  non passa allora corrente. Ne consegue che neanche su  $R_2$  passa corrente in quanto questa dovrebbe necessariamente andare su  $R_1$ . La tensione al nodo X e' quindi 0V. La corrente  $I_o$  va quindi tutta su  $R_3$  e  $V_o$  si porta a:

$$V_o = R_3 \cdot I_o = 30V$$

L'amplificatore operazionale deve fornire la corrente  $I_o$  e anche la corrente che scorre su  $R_4$ . Quindi la corrente totale fornita dall'amplificatore e':

$$I_{TOT} = I_o + \frac{V_o}{R_4} = 2mA$$

- 2- La funzione di trasferimento si puo' ricavare vedendo che la struttura e' una configurazione non-invertente con impedenza di reazione pari a  $(R_2 + R_3)/C$ . Si puo' quindi scrivere come:

$$\frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{(R_2 + R_3)/C}{R_1} = \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1}\right) \cdot \frac{1 + s \cdot C \cdot R_1}{1 + s \cdot C \cdot (R_2 + R_3)}$$

Sono presenti un polo a:

$$\omega_p = \frac{1}{C \cdot (R_2 + R_3)}$$

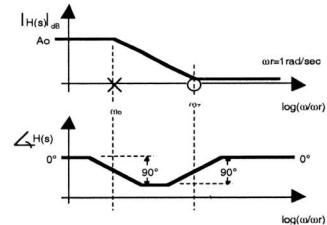
e uno zero a:

$$\omega_z = \frac{1}{C \cdot R_1} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} > \omega_p$$

Il guadagno in continua e':

$$A_o = \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1}\right)$$

I diagrammi di Bode sono i seguenti:



- 3- Per valutare l'impedenza in un punto si applica un generatore di test e si valuta la corrente assorbita da detto generatore di test. Nel caso del circuito in esame, la posizione del generatore di test e' identica a quella del generatore di segnale. Ci si puo' quindi avvantaggiare dell'analisi fatta al punto 2. In particolare si puo' osservare che l'unica corrente assorbita e' quella che scorre attraverso  $R_4$  che e' data da:

$$i_i = I_{R4} = \frac{v_i - v_o}{R_4}$$

Sostituendo a  $v_o$  l'espressione trovata al punto 2 e risolvendo per  $v_i/i_i$  si ottiene:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = -R_4 \cdot \frac{R_1}{R_2 + R_3} \cdot (1 + s \cdot C \cdot (R_2 + R_3))$$

## Prova di Esame

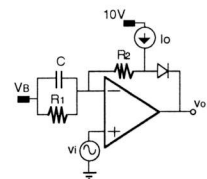
26 Gennaio 2000

### Esercizio 1

Il diodo e l'amplificatore in figura sono ideali.

- 1- Si calcoli il punto di lavoro
- 2- Si calcoli la funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$  (l'impedenza del diodo e'  $V_T/I_o$ )
- 3- Si calcoli il valore minimo di  $I_o$  per cui l'amplificatore non si porta ad un livello di saturazione.

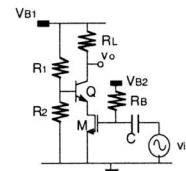
$$\begin{aligned} V_B &= -3V \\ R_1 &= 1k\Omega \\ R_2 &= 1k\Omega \\ I_o &= 5mA \\ C &= 20pF \end{aligned}$$



### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto di lavoro
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i$
- 3- Si valuti la massima escursione del segnale in uscita ( $V_{C_{sat}} = 0V$ )
- 4- Si valuti la corrente totale assorbita dalle due tensioni di alimentazione  $V_{B1}$  e  $V_{B2}$

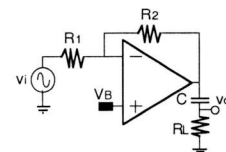
$$\begin{aligned} V_{B1} &= 10V \\ V_{B2} &= 2V \\ R_1 &= 3k\Omega \\ R_2 &= 2k\Omega \\ R_L &= 2k\Omega \\ R_B &= 3k\Omega \\ \beta &= \infty \\ V_{TH} &= 1V \\ k &= 3mA/V^2 \\ C &\Rightarrow \infty \end{aligned}$$



### Esercizio 3

L' amplificatore operazionale e' ideale.  $V_B = 3V$

- 1- Si valuti il punto operativo;
- 2- Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$ , e se ne traccino i diagrammi di Bode.
- 3- Si calcoli il guadagno alla pulsazione di 100krad/s.
- 4- Si descriva la risposta in uscita del circuito ad un gradino di ingresso di 100mV



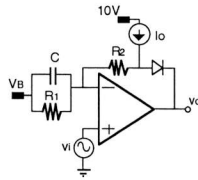
## Soluzioni

### Esercizio 1

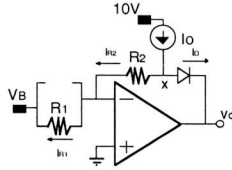
Il diodo e l'amplificatore in figura sono ideali.

- 1- Si calcoli il punto di lavoro
- 2- Si calcoli la funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$  (l'impedenza del diodo e'  $V_T/I_D$ )
- 3- Si calcoli il valore minimo di  $I_D$  per cui l'amplificatore non si porta ad un livello di saturazione.

$V_B = -3V$   
 $R_1 = 1k\Omega$   
 $R_2 = 1k\Omega$   
 $I_D = 5mA$   
 $C = 20pF$



- 1- Per il calcolo del punto di lavoro si trascura il condensatore e si spegne il generatore di segnale.



Assumendo che valga il principio di massa virtuale, si ottiene:

$$I_{R1} = \frac{0V - V_B}{R_1} = 3mA$$

Inoltre vale:

$$I_{R1} = I_{R2}$$

Si ottiene quindi la tensione al nodo X:

$$V_X = R_2 I_{R2} = 3V$$

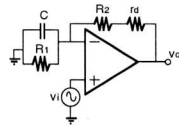
Applicando la legge di Kirchhoff al nodo X, si ottiene infine la corrente sul diodo:

$$I_D = I_O - I_{R2} = 2mA$$

Il diodo e' quindi acceso e la reazione e' chiusa. Vale allora il principio di massa virtuale come all'inizio ipotizzato

2-

Per il calcolo del guadagno di piccolo segnale si deve considerare il seguente circuito equivalente di piccolo segnale



ove la resistenza di piccolo segnale del diodo e':

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{25mV}{2mA} = 12.5\Omega$$

Il guadagno si puo' allora scrivere come

$$\frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2 + r_d}{R_1} \parallel C = 1 + \frac{R_2 + r_d}{R_1} \cdot (1 + s \cdot R_1 \cdot C) = \left(1 + \frac{R_2 + r_d}{R_1}\right) \cdot \left(1 + s \cdot C \cdot \frac{R_1}{1 + \frac{R_2 + r_d}{R_1}}\right)$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \left(1 + \frac{R_2 + r_d}{R_1}\right) \cdot \left(1 + s \cdot C \cdot \frac{R_1^2}{R_1 + R_2 + r_d}\right)$$

3-

L'anello di reazione e' chiuso finche' il diodo e' acceso. Cio' accade per  $I_D > 0$ . Cio' corrisponde ad avere:

$$I_D = I_O - I_{R2} > 0$$

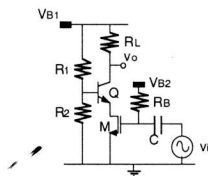
Da cui si ottiene:

$$I_O > I_{R2} = 3mA$$

### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto di lavoro
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i$
- 3- Si valuti la massima escursione del segnale in uscita ( $V_{C_{sat}} = 0V$ )
- 4- Si valuti la corrente totale assorbita dalle due tensioni di alimentazione  $V_{B1}$  e  $V_{B2}$

$V_{B1} = 10V$   
 $V_{B2} = 2V$   
 $R_1 = 3k\Omega$   
 $R_2 = 2k\Omega$   
 $R_L = 2k\Omega$   
 $R_B = 3k\Omega$   
 $\beta = \infty$   
 $V_{TH} = 1V$   
 $k = 3mA/V^2$   
 $C = \infty$



1-

Il transistor MOS non ha corrente di gate e quindi non scorre corrente su  $R_B$ . La tensione di gate e' quindi:

$$V_G = 2V$$

Essendo  $V_G > V_{TH}$ , il transistor e' acceso e tende a far scorrere una corrente.

Essendo  $\beta = \infty$ , si ha che la corrente di base e' nulla.

Si puo' quindi avere

$$V_B = V_{B1} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4V$$

La tensione di base (nell'ipotesi di transistor bipolare acceso) e':

$$V_E = V_B - V_{BE} = 3.3V$$

Il transistor MOS si trova in saturazione essendo:

$$V_{DS} = V_E = 3.3V > V_{GS} - V_{TH} = 1V$$

Si puo' allora calcolare la corrente:

$$I_M = k(V_{GS} - V_{TH})^2 = 3mA$$

Questa corrente (essendo  $\beta = \infty$ , e quindi  $I_E = I_C$  nel transistor bipolare) arriva tutta sul carico  $R_L$ . La tensione  $V_o$  in continua risulta quindi essere:

$$V_o = V_{B1} - I_M R_L = 6V$$

2-

Il transistor bipolare, avendo  $\beta = \infty$ , opera da buffer di corrente anche per il segnale. Lo stadio diventa quindi uno stadio di guadagno a source comune il cui guadagno di piccolo segnale risulta essere:

$$\frac{v_o}{v_i} = -g_m R_L$$

La transconduttanza del transistor MOS e':

$$g_m = 2 \cdot \frac{I_M}{V_{GS} - V_{TH}} = 6mA/V$$

Da cui si ottiene che:

$$\frac{v_o}{v_i} = -g_m R_L = -12$$

3-

Il nodo di uscita e' polarizzato a 6V. Verso l'alto si puo' muovere fino all'alimentazione  $V_{B1}$ , in quanto la resistenza  $R_L$  non cambia il suo funzionamento al variare della tensione ai suoi capi. Verso l'alto e' possibile quindi avere un'escursione di 4V. Verso il basso si deve invece verificare quando il transistor bipolare entra in saturazione. Si deve avere:

$$V_o - V_{segnale} = V_{C_{sat}} + V_B$$

Da cui si ottiene che il segnale verso il basso puo' avere un'escursione di 2V

4-

L'alimentazione  $V_{B1}$  fornisce la corrente del transistor M e del ramo  $R_1 + R_2$ . Quindi la sua corrente risulta essere:

$$I_{VB1} = I_M + \frac{V_{B1}}{R_1 + R_2} = 4mA$$

L'alimentazione  $V_{B2}$  non fornisce alcuna corrente in continua

### Esercizio 3

L'amplificatore operazionale e'  $V_B = 3V$

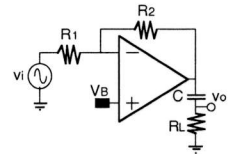
ideale.  $R_1 = 10k\Omega$

1- Si valuti il punto operativo;  $R_2 = 40k\Omega$

2- Si valuti la funzione di trasferimento  $v_o/v_i$ , e se ne traccino i diagrammi di Bode.  $C = 10pF$

3- Si calcoli il guadagno alla pulsazione di 100krad/s.

4- Si descriva la risposta in uscita del circuito ad un gradino di ingresso di 100mV



1- In continua il nodo di uscita dell'amplificatore operazionale si porta a

$$V_{out} = V_B \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 15V$$

Il nodo di uscita invece e' a 0V in quanto su  $R_L$  non passa corrente in continua.

2-

La funzione di trasferimento si puo' calcolare come:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{out}} \cdot \frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{s \cdot C \cdot R_L}{1 + s \cdot C \cdot R_L}$$

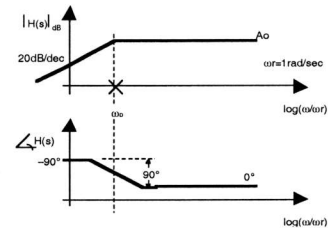
Si ha un polo ed uno zero. Lo zero e' nell'origine, mentre il polo e' alla pulsazione:

$$\omega_p = \frac{1}{C \cdot R_L} = 10Mrad/s$$

Il guadagno per  $s \rightarrow \infty$  e':

$$A_o = \frac{R_2}{R_1}$$

I diagrammi di Bode sono i seguenti:



3-

Il guadagno alla pulsazione 100krad/s si puo' calcolare osservando che tale pulsazione e' esattamente 2 decadi prima della posizione del polo. Quindi sara' 40dB (2decadi x 20dB/dec) inferiore al guadagno per una pulsazione infinita, e cioe':

$$\frac{v_o}{v_i}(100krad/s) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{100} = -0.04$$

4-

La risposta ad un gradino di 100mV e'

$$V_o(t) = -400mV \cdot e^{-t/R \cdot CL}$$

# Prova di Esame

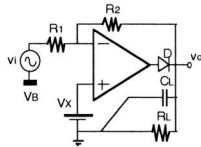
23 Febbraio 2000

## Esercizio 1

Il diodo e l'amplificatore sono ideali.

- 1- Per  $V_X=0V$ , si tracci la transcaratteristica  $V_O(V_B)$  per  $V_B$  tra -5V e 5V
- 2 - Per  $V_B=-2V$  e  $V_X=0$ , si calcoli la funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$  (l'impedenza del diodo e'  $V_T/I_D$ )
- 3- Per  $V_X=2V$ , si tracci la transcaratteristica  $V_O(V_B)$  per  $V_B$  tra -5V e 5V

$V_{SAT}=5V$   
 $V_{SAT}=-5V$   
 $R_1=1k\Omega$   
 $R_2=1k\Omega$   
 $R_L=1k\Omega$   
 $C_L=20pF$

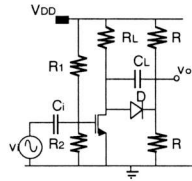


## Esercizio 2

Il diodo e' ideale.

- 1- Si valuti il punto di lavoro
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i$
- 3- Si indichi l'intervallo di valori di  $R_2$  per cui il diodo e' acceso

$V_{DD}=10V$   
 $R_1=3k\Omega$   
 $R_2=1k\Omega$   
 $R_L=3k\Omega$   
 $R=3k\Omega$   
 $V_{TH}=1.5V$   
 $k=2mA/V^2$   
 $C_i \Rightarrow \infty$   
 $C_L \Rightarrow \infty$



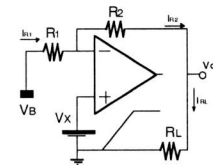
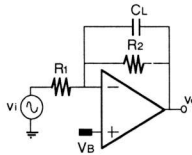
## Esercizio 3

L' amplificatore operazionale e' ideale.

- 1- Si dimensionino i valori dei componenti ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_L$ , e  $V_B$ ) in modo che:

- l'impedenza di ingresso vista dal generatore di ingresso  $V_i$  sia di  $10k\Omega$
- il guadagno  $v_o/v_i$  in continua valga -5
- la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$  presenti un polo a  $1Mrad/sec$
- il valore di polarizzazione di  $V_o$  sia  $12V$

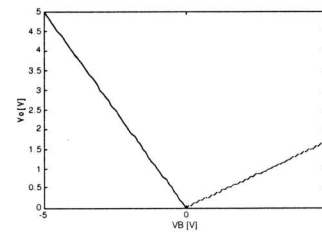
- 2- con il dimensionamento ottenuto si valuti quanti stadi come quello progettato sono necessari perche' un segnale a  $100Mrad/s$  sia attenuato di almeno  $100dB$  rispetto ad un segnale in continua



Si vede che si crea un partitore tra  $R_1$ - $R_2$  e  $R_L$ , di modo che l'uscita si porta a:

$$V_O = V_B \cdot \frac{R_L}{R_L + R_1 + R_2}$$

La transcaratteristica risulta quindi:



2-

Per  $V_B=-2V$ , il diodo e' acceso e quindi l'anello di reazione e' chiuso. Il guadagno e' quindi dato da:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} = -1$$

3-

L'esercizio si risolve come al punto 1. Solo che deve esser aggiunto (con la sovrapposizione degli effetti) l'azione di  $V_X$ . L'uscita allora, sotto l'ipotesi di diodo acceso e quindi di anello di reazione chiuso, si porta a:

$$V_O = V_X \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - V_B \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

La corrente nel diodo si puo' scrivere come:

$$I_D = -I_{R2} + I_{RL}$$

con

$$I_{R2} = I_{R1} = \frac{V_B - V_X}{R_1}$$

$$I_{RL} = \frac{V_O}{R_L} = \frac{V_X \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - V_B \cdot \frac{R_2}{R_1}}{R_L}$$

Perche' il diodo sia acceso si deve avere

$$I_D = -I_{R2} + I_{RL} > 0$$

$$I_D = -\frac{V_B - V_X}{R_1} + \frac{V_X \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - V_B \cdot \frac{R_2}{R_1}}{R_L} > 0$$

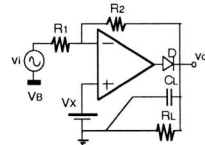
## Soluzioni

### Esercizio 1

Il diodo e l'amplificatore sono ideali.

- 1- Per  $V_X=0V$ , si tracci la transcaratteristica  $V_O(V_B)$  per  $V_B$  tra -5V e 5V
- 2 - Per  $V_B=-2V$  e  $V_X=0$ , si calcoli la funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$  (l'impedenza del diodo e'  $V_T/I_D$ )
- 3- Per  $V_X=2V$ , si tracci la transcaratteristica  $V_O(V_B)$  per  $V_B$  tra -5V e 5V

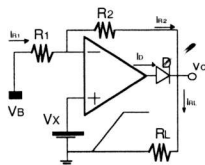
$V_{SAT}=5V$   
 $V_{SAT}=-5V$   
 $R_1=1k\Omega$   
 $R_2=1k\Omega$   
 $R_L=1k\Omega$   
 $C_L=20pF$



1- Il sistema si comporta in maniera differente a seconda che il diodo sia acceso o spento. Se il diodo e' acceso allora l'anello di reazione e' attivo e vale il principio di massa virtuale.

Si supponga quindi il diodo acceso. Il valore di  $V_O$  risulta quindi essere:

$$V_O = -V_B \cdot \frac{R_2}{R_1}$$



La corrente nel diodo  $I_D$  si puo' scrivere come

$$I_D = -I_{R2} + I_{RL}$$

con

$$I_{R2} = I_{R1} = \frac{V_B}{R_1}$$

$$I_{RL} = \frac{V_O}{R_L} = \frac{-V_B \cdot \frac{R_2}{R_1}}{R_L}$$

Perche' il diodo sia acceso si deve avere

$$I_D = -I_{R2} + I_{RL} > 0$$

$$I_D = -\frac{V_B}{R_1} + \frac{-V_B \cdot \frac{R_2}{R_1}}{R_L} > 0$$

Cio' e' valido per:

$$V_B < 0$$

Quindi per  $V_B < 0$ , il diodo e' acceso e la reazione e' chiusa. L'uscita si porta quindi a:

$$V_O = -V_B \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Al contrario, per  $V_B > 0$ , il diodo e' spento e l'anello di reazione e' aperto. Il circuito da studiare e' quello di seguito mostrato.

Risolvendo per  $V_B$  si ottiene il valore:

$$V_B < \frac{3}{2} \cdot V_X = 3V$$

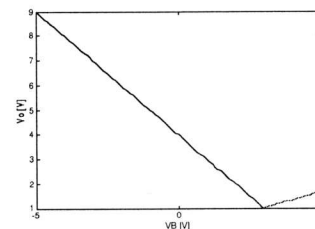
Per  $V_B < 3V$  l'anello di reazione e' chiuso e si ha che:

$$V_O = V_X \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - V_B \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Mentre per  $V_B > 3V$  l'anello di reazione e' aperto e si ha che:

$$V_O = V_B \cdot \frac{R_L}{R_1 + R_2 + R_L}$$

La transcaratteristica risulta quindi essere:

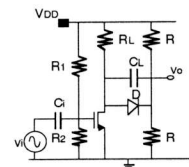


### Esercizio 2

Il diodo e' ideale.

- 1- Si valuti il punto di lavoro
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i$
- 3- Si indichi l'intervallo di valori di  $R_2$  per cui il diodo e' acceso

$V_{DD}=10V$   
 $R_1=3k\Omega$   
 $R_2=1k\Omega$   
 $R_L=3k\Omega$   
 $R=3k\Omega$   
 $V_{TH}=1.5V$   
 $k=2mA/V^2$   
 $C_i \Rightarrow \infty$   
 $C_L \Rightarrow \infty$



1-

Il gate del transistor MOS si porta alla tensione fissata dal partitore  $R_1$ - $R_2$ :

$$V_G = V_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2.5V = V_{GS}$$

Il transistor MOS e' quindi acceso (essendo  $V_{GS} > V_{TH}$ ).

Si supponga che sia in saturazione.

La sua corrente e' allora:

$$I_M = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2 = 2mA$$

Si supponga ora il diodo spento.

Allora si ha che i due rami sono disaccoppiati in continua (cioe' indipendenti).

La tensione del drain e' allora data da:

$$V_D = V_{DD} - R_L \cdot I_M = 4V$$

La tensione in continua in uscita  $V_O$  e' fissata dal partitore  $R$ - $R$  ed e':

$$V_O = V_{DD} \cdot \frac{R}{R + R} = 5V$$

Si puo' quindi verificare che il transistor e' effettivamente in saturazione in quanto:

$$V_{DS} = 4V > V_{GS} - V_{TH} = 1V$$

Inoltre il diodo e' spento in quanto:

$$V_{DIODO} = V_D - V_O = -1V$$

2-

Per il calcolo del guadagno si può osservare che cortocircuitando entrambi i condensatori, lo stadio diventa un source comune che ha un carico pari al parallelo di  $R_L // R // R$ . Ne segue che il suo guadagno è:

$$\frac{V_o}{V_i} = -g_m \cdot (R_L // R // R)$$

La transconduttanza si calcola dal punto di lavoro:

$$g_m = 2 \cdot \frac{I_M}{V_{GS} - V_{TH}} = 4 \text{ mA/V}$$

Da cui si ottiene:

$$\frac{V_o}{V_i} = -g_m \cdot (R_L // R // R) = -4$$

3-

Il diodo si accende quando si ha che:

$$V_D \geq V_o$$

Per cui è necessario trovare il valore di  $R_2$  per cui

$$V_D = V_o = 5V$$

$V_D$  può essere espresso come segue (supponendo il transistor acceso ed in zona di saturazione):

$$V_D = V_{DD} - I_M R_L = V_{DD} - k(V_{GS} - V_{TH})^2 \cdot R_L =$$

$$V_D = V_{DD} - k \left( \frac{V_D}{R_1 + R_2} - V_{TH} \right)^2 \cdot R_L = 5V$$

Risolviendo questa equazione per  $R_2$  si ottengono due valori:

$$R_2 = 187.1 \Omega$$

$$R_2 = 954.1 \Omega$$

Dei due valori, il primo fa sì che si abbia:

$$V_{GS} = 0.586 V < V_{TH}$$

Il transistor sarebbe spento e quindi non vale (il risultato viene ottenuto partendo dall'ipotesi di diodo acceso).

Per il secondo valore, si ottiene:

$$V_{GS} = 2.412 V$$

Questo valore fa sì che il transistor sia acceso e quindi è quello corretto (perché nello scrivere l'equazione di partenza si è assunto che il transistor sia acceso).

Il diodo risulta quindi acceso per:

$$R_2 < 954.1 \Omega$$

Da notare che per un certo intervallo di valori di  $R_2$  il transistor è ancora acceso. Abbassando il valore di  $R_2$  da un certo valore in poi il transistor è spento e comunque il diodo resta acceso

### Esercizio 3

L' amplificatore operazionale è ideale.

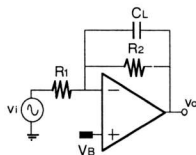
1- Si dimensionino i valori dei componenti ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_L$ , e  $V_B$ ) in modo che:

- l'impedenza di ingresso vista dal generatore di ingresso  $V_i$  sia di  $10k\Omega$
- il guadagno  $v_o/v_i$  in continua valga  $-5$
- la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$  presenti un polo a  $1 \text{ Mrad/sec}$
- il valore di polarizzazione di  $V_o$  sia  $12V$

2- con il dimensionamento ottenuto si valuti quanti stadi come quello progettato sono necessari perché un segnale a  $100 \text{ Mrad/s}$  sia attenuato di almeno  $100 \text{ dB}$  rispetto ad un segnale in continua

1-

L'impedenza di ingresso vista da  $V_i$  è data da  $R_1$ . Quindi si ha subito che:



## Prova di Esame

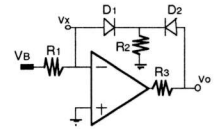
7 Aprile 2000

### Esercizio 1

I diodi e l'amplificatore sono ideali.

- 1- Si tracci la transcaratteristica  $V_o(V_B)$  per  $V_B$  tra  $-5V$  e  $5V$
- 2- Si tracci la transcaratteristica  $V_x(V_B)$  per  $V_B$  tra  $-5V$  e  $5V$

$$\begin{aligned} V_{SAT}^+ &= 5V \\ V_{SAT}^- &= -5V \\ R_1 &= 1k\Omega \\ R_2 &= 1k\Omega \\ R_3 &= 1k\Omega \end{aligned}$$



### Esercizio 2

1- Per  $V_B=0V$ , si valuti il punto di lavoro

2- Per  $V_B=0V$ , si calcoli il guadagno  $v_o/v_i(s)$  e se ne traccino i

diagrammi di Bode

3- Per  $V_B=10V$ , si calcoli il

guadagno  $v_o/v_i(s)$

$$V_{DD} = 10V$$

$$I_0 = 1 \text{ mA}$$

$$R_B = 2k\Omega$$

$$R_L = 3k\Omega$$

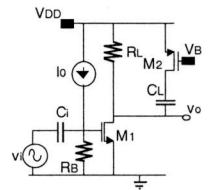
$$V_{TH\_PMOS} = 1.5V$$

$$k_{NMOS} = 2 \text{ mA/V}^2$$

$$k_{PMOS} = 2 \text{ mA/V}^2$$

$$C_i \Rightarrow \infty$$

$$C_L = 1 \text{ nF}$$



### Esercizio 3

L' amplificatore operazionale è ideale.

1- Si calcoli il punto di lavoro (correnti in TUTTI i rami e tensioni in TUTTI i nodi);

2- Si calcolino le funzioni di

trasferimento  $v_1/v_i(s)$  e  $v_o/v_i(s)$ ;

3- Si valuti l'andamento della

tensione  $v_1(t)$  in risposta ad un

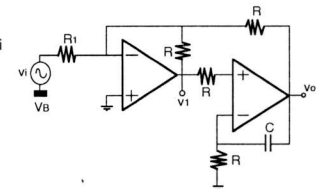
gradino in ingresso di  $+100 \text{ mV}$

4- Si valuti l'effetto dell'offset del

primo amplificatore sui nodi di uscita

$v_1$  e  $v_o$ ;

$$R_1 = 10k\Omega; R = 5k\Omega; C = 10pF; V_B = 3V$$



## Soluzioni

### Esercizio 1

I diodi e l'amplificatore sono ideali.

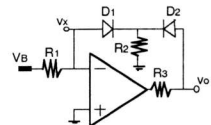
1- Si tracci la transcaratteristica  $V_o(V_B)$

per  $V_B$  tra  $-5V$  e  $5V$

2- Si tracci la transcaratteristica

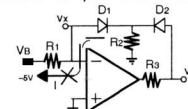
$V_x(V_B)$  per  $V_B$  tra  $-5V$  e  $5V$

$$\begin{aligned} V_{SAT}^+ &= 5V \\ V_{SAT}^- &= -5V \\ R_1 &= 1k\Omega \\ R_2 &= 1k\Omega \\ R_3 &= 1k\Omega \end{aligned}$$



1-

Si inizia col valutare le condizioni di funzionamento per  $V_B = -5V$ . Se si suppone la reazione attiva, vale il principio di massa virtuale e quindi l'ingresso negativo dell'amplificatore si porta a massa. Cio' però è impossibile perché comporterebbe una corrente come indicato in figura che non può essere sostenuta dal diodo  $D_1$ .



Allora l'anello di reazione non è chiuso e non vale il principio di massa virtuale. Nel diodo  $D_1$  non scorre corrente e quindi l'ingresso negativo dell'amplificatore si porta a  $V_B$ :

$$V^- = V_B$$

L'amplificatore opera allora in saturazione e la sua uscita va alla saturazione positiva  $V_{SAT}^+$ , in quanto

$$V_{O\_AMPLIFICATORE} = A \cdot (V^+ - V^-) = A \cdot (-V^-) = A \cdot (5V) = V_{SAT}^+$$

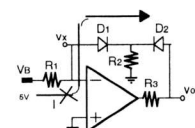
Allora si crea una corrente dall'uscita dell'amplificatore verso massa attraverso  $R_3$ - $D_2$ - $R_2$ . Il diodo  $D_2$  è ideale e quindi in conduzione non ha nessuna caduta ai suoi capi. L'uscita  $V_o$  si porta quindi a:

$$V_o = V_{SAT}^+ \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 2.5V$$

Questo funzionamento vale finché la tensione  $V_B$  tira una corrente come indicato prima, cioè per  $V_B < 0$ . In questo intervallo si ha quindi:

$$V_o = V_{SAT}^+ \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

Invece, per  $V_B > 0$ , una corrente come quella indicata in figura (che farebbe chiudere l'anello di reazione) non può scorrere perché  $D_2$  non può accettarla. Allora anche in questo caso l'anello è aperto e non vale il principio di massa virtuale.







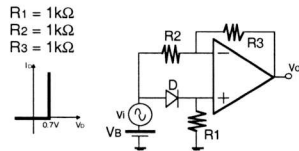
# Prova di Esame

8 Giugno 2000

## Esercizio 1

Il diodo ha la relazione I-V mostrata in figura. L'amplificatore e' ideale.

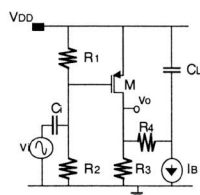
- 1- Si tracci la transcaratteristica  $V_o(V_B)$  per  $V_B$  tra -5V e 5V ( $v_i=0$ )
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i$  per  $V_B=3V$
- 3- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i$  per  $V_B=-3V$



## Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i(s)$  e se ne traccino i diagrammi di Bode
- 3- Si dimensionino  $R_1$  in modo che il modulo del guadagno in continua sia di 30;

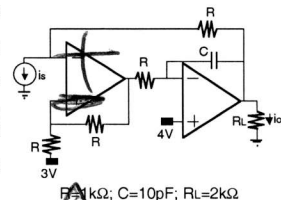
$V_{DD} = 10V$   
 $I_B = 1mA$   
 $R_1 = 2k\Omega$   
 $R_2 = R_3 = 6k\Omega$   
 $R_4 = 1k\Omega$   
 $V_{TH} = -1.5V$   
 $k_{MOS} = 2mA/V^2$   
 $C_i = \infty$   
 $C_L = 100pF$



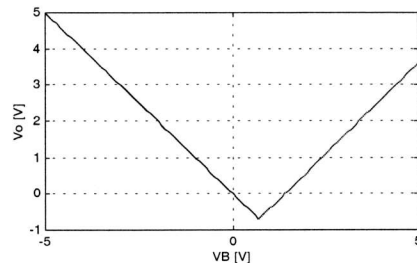
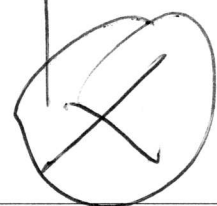
## Esercizio 3

Gli amplificatori operazionali sono ideali e  $i_s$  e' un generatore di segnale.

- 1- Si calcoli il punto di lavoro (correnti in TUTTI i rami e tensioni in TUTTI i nodi);
- 2- Si calcoli la funzione di trasferimento  $i_o/i_s(s)$ ;
- 3- Si valuti l'andamento della corrente  $i_o(t)$  in risposta ad un gradino in ingresso di +1mA
- 4- Si valuti l'impedenza di ingresso vista dal generatore  $i_s$ .



$R = 1k\Omega$ ;  $C = 10pF$ ;  $R_L = 2k\Omega$



2 -

Per  $V_B = -3V$  il diodo e' acceso e sul ramo D e  $R_1$  scorre una corrente non-nulla. Si puo' calcolare l'impedenza del diodo che viene percorso da una corrente che e':

$$I_D = \frac{V_B - 0.7V}{R_1} = 2.3mA$$

L'impedenza e' quindi:

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{25mV}{2.3mA} = 10.87 \Omega$$

Per il guadagno di piccolo segnale la tensione  $v_x$  e' quindi:

$$v_x = v_i \cdot \frac{R_1}{R_1 + r_d}$$

Per  $v_o$  si scrive quindi l'equazione di Kirchoff:

$$\frac{v_i - v_x}{R_2} = \frac{v_x - v_o}{R_3}$$

Da cui si ricava:

$$v_o = v_x + \frac{R_3}{R_2} \cdot (v_x - v_i) = v_i \left( \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right) \cdot \frac{R_1}{R_1 + r_d} - \frac{R_3}{R_2} \right)$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right) \cdot \frac{R_1}{R_1 + r_d} - \frac{R_3}{R_2}$$

3 -

Per  $V_B = -3V$  il diodo e' spento. Il nodo  $V_x$  si porta quindi a massa e' il guadagno si puo' scrivere come:

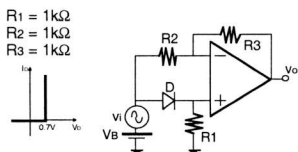
$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_3}{R_2}$$

## Soluzioni

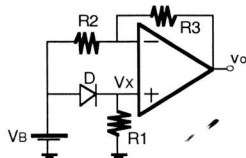
### Esercizio 1

Il diodo ha la relazione I-V mostrata in figura. L'amplificatore e' ideale.

- 1- Si tracci la transcaratteristica  $V_o(V_B)$  per  $V_B$  tra -5V e 5V ( $v_i=0$ )
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i$  per  $V_B=3V$
- 3- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i$  per  $V_B=-3V$



1 -  
 Per la polarizzazione si puo' trascurare il generatore  $v_i$  (che e' di segnale). Il circuito da studiare diventa:



Il ramo D- $R_1$  puo' essere studiato indipendentemente. La tensione  $V_x$ , a seconda che il diodo sia acceso o spento, e' data da:

$$V_x = 0V \quad \text{per } V_B < 0.7V \text{ (diodo spento)}$$

$$V_x = V_B - 0.7V \quad \text{per } V_B > 0.7V \text{ (diodo}$$

acceso)

Si devono quindi studiare i due casi: per  $V_B < 0.7V$  e per  $V_B > 0.7V$ .

Per  $V_B < 0.7V$ , si ha  $V_x = 0$  e quindi si ha:

$$V_o = -\frac{R_3}{R_2} \cdot V_B$$

Per  $V_B > 0.7V$ , si ha che  $V_x = V_B - 0.7V$  e quindi si scrive l'equazione di Kirchoff al nodo di massa virtuale:

$$\frac{V_B - V_x}{R_2} = \frac{V_x - V_o}{R_3}$$

Da cui si ricava:

$$\frac{V_B - (V_B - 0.7V)}{R_2} = \frac{(V_B - 0.7V) - V_o}{R_3}$$

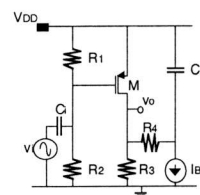
$$V_o = V_B - 0.7V - 0.7V \cdot \frac{R_3}{R_2} = V_B - 1.4V$$

La transcaratteristica risulta essere la seguente:

### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i(s)$  e se ne traccino i diagrammi di Bode
- 3- Si dimensionino  $R_1$  in modo che il modulo del guadagno in continua sia di 30;

$V_{DD} = 10V$   
 $I_B = 1mA$   
 $R_1 = 2k\Omega$   
 $R_2 = R_3 = 6k\Omega$   
 $R_4 = 1k\Omega$   
 $V_{TH} = -1.5V$   
 $k_{MOS} = 2mA/V^2$   
 $C_i = \infty$   
 $C_L = 100pF$



1-

Si puo' dapprima calcolare la tensione di gate fissata dal partitore  $R_1$ - $R_2$ . Ne risulta:

$$V_G = V_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 7.5V$$

Assumendo che il transistor M operi in saturazione, si puo' calcolare la sua corrente:

$$I_M = k_{MOS} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2 = 2mA$$

Questa corrente si divide tra il ramo  $R_4$ - $I_B$  e la resistenza  $R_3$ . Nel ramo  $R_4$ - $I_B$  scorre la corrente  $I_B$ . Nella resistenza  $R_3$  scorre pertanto una corrente pari a:

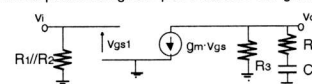
$$I_{R3} = I_M - I_B = 1mA$$

La tensione  $V_o$  in polarizzazione si porta quindi a:

$$V_o = I_{R3} \cdot R_3 = 6V.$$

Il transistor opera quindi correttamente in saturazione.

2- Il circuito equivalente di piccolo segnale per il calcolo del guadagno e' il seguente:



Si e' trascurata l'impedenza di uscita del transistor ed il valore di  $g_m$  e':

$$g_m = 2 \cdot k \cdot (V_{GS} - V_{TH}) = 4mA/V$$

Il guadagno risulta essere:

$$\frac{v_o}{v_i} = -g_m \cdot \left( R_3 \parallel \left( R_4 + \frac{1}{s \cdot C_L} \right) \right) = -g_m \cdot \frac{R_3 \cdot \left( R_4 + \frac{1}{s \cdot C_L} \right)}{R_3 + R_4 + \frac{1}{s \cdot C_L}}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = -g_m \cdot R_3 \cdot \frac{1 + s \cdot R_4 \cdot C_L}{1 + s \cdot (R_3 + R_4) \cdot C_L}$$

La funzione di trasferimento e' caratterizzata dai seguenti parametri:

Guadagno in continua

$$A_o = g_m \cdot R_3 = 24$$

Posizione del polo

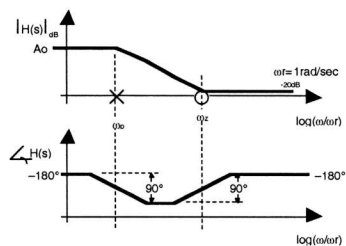
$$\omega_p = \frac{1}{C_L \cdot (R_3 + R_4)}$$

Posizione dello zero

$$\omega_z = \frac{1}{C_L \cdot R_4}$$

I diagrammi di Bode sono i seguenti:





3-

In continua il guadagno si esprime come:

$$A_0 = g_m \cdot R_3 = 2 \cdot k \cdot (V_{GS} - V_{TH}) \cdot R_3 = 2 \cdot k \cdot (V_{DD} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{TH}) \cdot R_3$$

Da cio' si puo' estrarre il valore di  $R_1$  fissando  $A_0=30$  e si ottiene:

$$R_1 = \frac{R_2}{\frac{A_0}{2 \cdot k \cdot R_3} + V_{TH}} = 2.276 \text{ k}\Omega$$

### Esercizio 3

Gli amplificatori operazionali sono ideali e  $i_s$  e' un generatore di segnale.

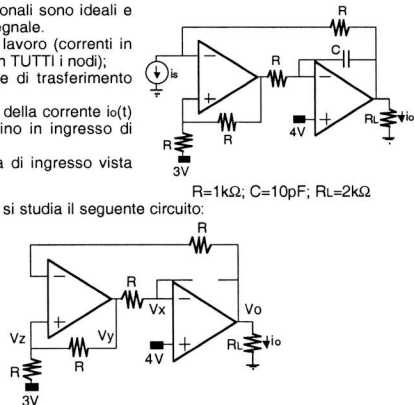
1- Si calcoli il punto di lavoro (correnti in TUTTI i rami e tensioni in TUTTI i nodi);

2- Si calcoli la funzione di trasferimento  $i_o/i_s(s)$ ;

3- Si valuti l'andamento della corrente  $i_o(t)$  in risposta ad un gradino in ingresso di +1mA

4- Si valuti l'impedenza di ingresso vista dal generatore  $i_s$ .

1- Per la polarizzazione si studia il seguente circuito:



$$R=1\text{k}\Omega, C=10\text{pF}, R_L=2\text{k}\Omega$$

Per il principio di massa virtuale si ha:

$$V_x = 4\text{V}$$

All'ingresso del secondo operazionale non scorre corrente, quindi si ha che:

$$V_y = V_x = 4\text{V}$$

Facendo la partizione resistiva si ha che:

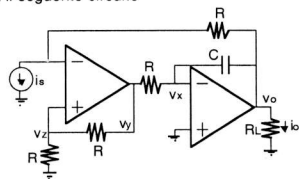
$$V_z = 3\text{V} + (4\text{V} - 3\text{V}) \cdot \frac{R}{R + R} = 3.5\text{V}$$

Anche all'ingresso del primo operazionale non scorre corrente, quindi si ha che:

$$V_o = V_z = 3.5\text{V}$$

2-

Per il segnale si studia il seguente circuito



Si puo' scrivere:

$$\begin{aligned} V_o &= V_z + R \cdot i_s \\ V_y &= V_z \cdot \left(1 + \frac{R}{R}\right) = 2 \cdot V_z \\ V_o &= -\frac{1}{s \cdot R \cdot C} \cdot V_y \end{aligned}$$

Risolviendo si ottiene

$$V_o = -\frac{1}{s \cdot R \cdot C} \cdot V_y = -\frac{1}{s \cdot R \cdot C} \cdot 2 \cdot V_z = -\frac{1}{s \cdot R \cdot C} \cdot 2 \cdot (V_o - R \cdot i_s)$$

Da cui:

$$V_o = \frac{R \cdot i_s \cdot \frac{1}{s \cdot R \cdot C} \cdot 2}{1 + 2 \cdot \frac{1}{s \cdot R \cdot C}} = \frac{2 \cdot R \cdot i_s}{2 + s \cdot R \cdot C} = \frac{R \cdot i_s}{1 + s \cdot \frac{R \cdot C}{2}}$$

La corrente  $i_o$  e' infine data da:

$$i_o = \frac{V_o}{R_L} = \frac{R}{R_L} \cdot \frac{i_s}{1 + s \cdot \frac{R \cdot C}{2}}$$

Il guadagno di corrente e' quindi:

$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{R}{R_L} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \frac{R \cdot C}{2}}$$

3-

La risposta che si ottiene e' quella di un sistema a singolo polo ed e' quindi:

$$i_o(t) = 1\text{mA} \cdot \frac{R}{R_L} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{2t}{R \cdot C}\right)\right)$$

4-

Per calcolare l'impedenza di ingresso si puo' applicare un generatore di test di corrente posizionato come  $i_s$  e si calcola la tensione che ne risulta. Si puo' osservare che la tensione e'  $V_z$ . Dai calcoli svolti al punto 2 si ottiene:

$$V_z = V_o - R \cdot i_s = \frac{R \cdot i_s}{1 + s \cdot \frac{R \cdot C}{2}} - R \cdot i_s = R \cdot \frac{s \cdot \frac{R \cdot C}{2}}{1 + s \cdot \frac{R \cdot C}{2}} \cdot i_s$$

Da cui si ricava che l'impedenza di ingresso e':

$$Z_{in} = \frac{V_z}{i_s} = R \cdot \frac{s \cdot \frac{R \cdot C}{2}}{1 + s \cdot \frac{R \cdot C}{2}}$$

## Prova di Esame

28 Giugno 2000

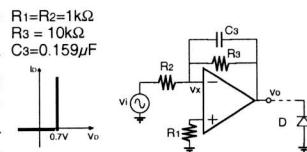
### Esercizio 1

Il diodo ha la relazione I-V mostrata in figura. L'amplificatore e' ideale.

1- Si calcoli il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;

2- Per  $v_i(t) = 1\text{V} \cdot \sin(2\pi \cdot 100\text{kHz} \cdot t)$ , si tracci l'andamento delle tensioni  $v_o(t)$  e  $v_x(t)$ ;

3- Si colleghi il diodo D, e si tracci per  $v_i(t) = 1\text{V} \cdot \sin(2\pi \cdot 100\text{kHz} \cdot t)$ , l'andamento delle tensioni  $v_o(t)$  e  $v_x(t)$ ;

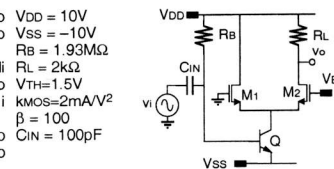


### Esercizio 2

1- Per  $V_B = -3\text{V}$ , si valutino il punto di lavoro del circuito e il guadagno  $v_o/v_i(s)$

2- Per  $V_B = 0\text{V}$ , si valutino il punto di lavoro del circuito e il guadagno  $v_o/v_i(s)$  e se ne traccino i diagrammi di Bode

3- Per  $V_B = +3\text{V}$ , si valutino il punto di lavoro del circuito e il guadagno  $v_o/v_i(s)$



### Esercizio 3

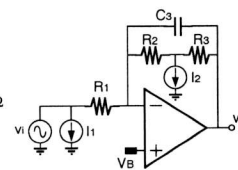
L' amplificatore operazionale e' ideale.

1- Si calcoli il punto di lavoro;

2- Si calcoli la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;

3- Si valuti l'andamento di  $v_o(t)$  in risposta ad un gradino in ingresso di 10mV

4- Si valuti la variazione della tensione di uscita per un offset di 10mV.



## Soluzioni

### Esercizio 1

Il diodo ha la relazione I-V mostrata in figura. L'amplificatore e' ideale.

- 1- Si calcoli il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;
- 2- Per  $v_i(t) = 1V \sin(2\pi \cdot 100kHz \cdot t)$ , si tracci l'andamento delle tensioni  $v_o(t)$  e  $v_x(t)$ ;
- 3- Si colleghi il diodo D, e si tracci per  $v_i(t) = 1V \sin(2\pi \cdot 100kHz \cdot t)$ , l'andamento delle tensioni  $v_o(t)$  e  $v_x(t)$ ;

Per la polarizzazione si puo' trascurare il generatore  $v_i$  (che e' di segnale). Si puo' allora vedere che:

$$\begin{aligned} v_i &= 0V \\ v_x &= 0V \\ v_o &= 0V \end{aligned}$$

Le correnti in tutti i rami sono nulle.

La funzione di trasferimento si calcola come:

$$\frac{v_o}{v_i}(s) = -\frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot R_3 \cdot C_3} = -\frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot R_3 \cdot C_3}$$

2-

La funzione di trasferimento prima calcolata presenta un polo a:

$$f_p = \frac{1}{2\pi \cdot R_3 \cdot C_3} = 100 \text{ Hz}$$

La frequenza del segnale di ingresso (100kHz) e' tre decadi superiore a quella del polo. Cio' comporta che si abbia un'attenuazione di 60dB. Il segnale viene quindi elaborato con un guadagno di 0.001 rispetto al valore in continua. Il guadagno in continua e':

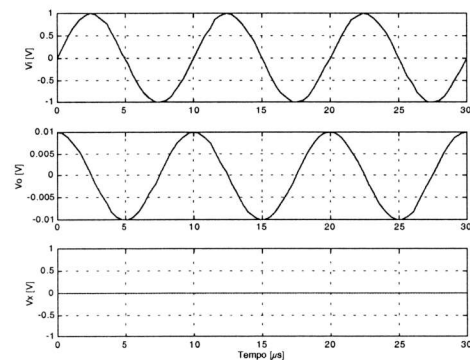
$$\frac{v_o}{v_i}(0) = -\frac{R_3}{R_2} = -10$$

In totale in segnale in uscita e' una sinusoide a 100kHz di ampiezza:

$$\text{Ampiezza} = 10 \cdot 0.001 \cdot 1V = 10mV$$

Il segnale e' ben oltre il polo e quindi ha uno sfasamento di  $-90^\circ$  rispetto al segnale in ingresso. In aggiunta c'e' anche uno sfasamento di  $-180^\circ$  dovuto al fatto che la funzione di trasferimento presenta un guadagno negativo.

Per l'intera escursione del segnale vale il principio di massa virtuale e quindi  $v_x$  resta uguale a massa. I grafici sono i seguenti:



3-

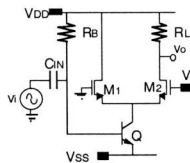
L'escursione del segnale in uscita non e' sufficiente ampio da attivare il diodo che quindi non influisce sul funzionamento del circuito. L'escursione del segnale e' quindi uguale a quella del punto 2.

Si provi a risolvere l'esercizio assumendo una frequenza di ingresso di 1kHz.

### Esercizio 2

- 1- Per  $V_B = -3V$ , si valutino il punto di lavoro del circuito e il guadagno  $v_o/v_i(s)$ ;
- 2- Per  $V_B = 0V$ , si valutino il punto di lavoro del circuito e il guadagno  $v_o/v_i(s)$  e se ne traccino i diagrammi di Bode;
- 3- Per  $V_B = +3V$ , si valutino il punto di lavoro del circuito e il guadagno  $v_o/v_i(s)$ ;

$V_{DD} = 10V$   
 $V_{SS} = -10V$   
 $R_B = 1.93M\Omega$   
 $R_L = 2k\Omega$   
 $V_{TH} = 1.5V$   
 $k_{MOS} = 2mA/V^2$   
 $\beta = 100$   
 $C_{IN} = 100pF$



1-

La corrente di base del transistor e':

$$I_B = \frac{V_{DD} - V_{SS} - V_{BE}}{R_B} = \frac{19.3V}{1.93M\Omega} = 10\mu A$$

La corrente di collettore e':

$$I_C = \beta \cdot I_B = 1mA$$

Lo stadio differenziale M1-M2 e' in questo caso sbilanciato ed il transistor M2 e' spento. Infatti, assumendo solo M1 acceso ed in saturazione, si ha che tutta la corrente  $I_C$  passa in M1. La tensione  $V_{GS}$  di M1 e' quindi:

$$V_{GS1} = V_{TH} + \sqrt{\frac{I_C}{k}} = 1.5V + \sqrt{\frac{1mA}{2mA/V^2}} = 2.2071V$$

Posto  $V_{S1} = V_{S2} = V_X$ , segue che si ha che

$$V_X = 0 - V_{GS1} = -2.2071V$$

Osservando ora M2 si puo' constatare che:

$$V_{GS2} = -3V - (-2.2071V) = -0.79290V$$

Essendo  $V_{GS2}$  minore della tensione di soglia ( $-0.79290V < -1.5V$ ) si verifica che era valida l'ipotesi di M2 spento.

La tensione  $V_o$  si porta quindi a  $V_{DD}$  in quanto non c'e' corrente su M2.

Per cio' che concerne il guadagno  $v_o/v_i$ , essendo M2 spento non c'e' un cammino tra l'ingresso e l'uscita e quindi si ha che:

$$v_o/v_i = 0$$

2-

La corrente di base del transistor e':

$$I_B = \frac{V_{DD} - V_{SS} - V_{BE}}{R_B} = \frac{19.3V}{1.93M\Omega} = 10\mu A$$

La corrente di collettore e':

$$I_C = \beta \cdot I_B = 1mA$$

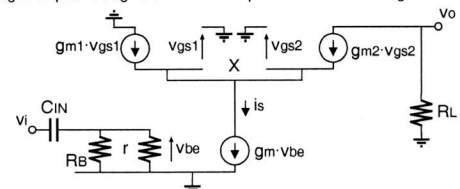
Lo stadio differenziale M1-M2 e' in questo caso bilanciato in quanto i due transistor operano con stessa  $V_{GS}$ . Pertanto portano uguale corrente e la somma di  $I_{R1}$  e  $I_{R2}$  e' uguale a  $I_C$ . Risulta pertanto che:

$$I_{M1} = I_{M2} = I_C/2 = 0.5mA$$

La tensione del nodo di uscita si porta quindi a:

$$V_o = V_{DD} - I_{M2} \cdot R_L = 10 - 0.5mA \cdot 2k\Omega = 9V$$

Per il guadagno si puo' disegnare il circuito equivalente che e' il seguente:



I valori dei vari parametri sono:

$$g_m = \frac{I_C}{V_{TH}} = \frac{1mA}{25mV} = 40 \text{ mA/V}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = 2.5 \text{ k}\Omega$$

$$g_{m1} = g_{m2} = 2 \cdot \sqrt{k \cdot I_{M1}} = 2 \cdot \sqrt{2mA/V^2 \cdot 0.5mA} = 2 \text{ mA/V}$$

Il segnale in corrente  $i_s$  e' dato da:

$$i_s = g_m \cdot v_{be} = g_m \cdot v_i \cdot \frac{r_{\pi}/R_B}{1 + s \cdot C_{IN} \cdot r_{\pi}/R_B} \approx \frac{s \cdot C_{IN} \cdot r_{\pi}}{1 + s \cdot C_{IN} \cdot r_{\pi}} \cdot g_m \cdot v_i$$

ove si e' trascurata  $R_B$  in quanto in parallelo a  $r_{\pi}$  e molto maggiore di  $r_{\pi}$  ( $1.93M\Omega \gg 2.5k\Omega$ )

Si scrive poi l'equazione di Kirchoff al nodo X

$$i_s = g_{m1} \cdot v_{gs1} + g_{m2} \cdot v_{gs2}$$

Essendo  $g_{m1} = g_{m2}$  e  $v_{gs1} = v_{gs2}$ , ne segue che:

$$g_{m2} \cdot v_{gs2} = \frac{i_s}{2}$$

questa corrente e' quella che arriva sul carico. La tensione di uscita si scrive allora come:

$$v_o = -g_{m2} \cdot v_{gs2} \cdot R_L = -\frac{s \cdot C_{IN} \cdot r_{\pi}}{1 + s \cdot C_{IN} \cdot r_{\pi}} \cdot \frac{g_m}{2} \cdot R_L \cdot v_i$$

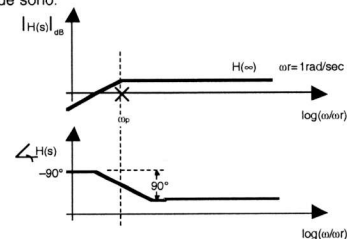
Il guadagno risulta essere:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{s \cdot C_{IN} \cdot r_{\pi}}{1 + s \cdot C_{IN} \cdot r_{\pi}} \cdot \frac{g_m}{2} \cdot R_L$$

Per i diagrammi di Bode il guadagno si puo' riscrivere come:

$$H(s) = \frac{v_o}{v_i}(s) = -\frac{s \cdot \tau_p}{1 + s \cdot \tau_p} \cdot \frac{g_m}{2} \cdot R_L$$

I diagrammi di Bode sono:



con:

$$\begin{aligned} \omega_p &= \frac{1}{\tau_p} \\ H(\infty) &= \frac{\tau_p}{\tau_p} \cdot \frac{g_m}{2} \cdot R_L = \frac{g_m}{2} \cdot R_L \end{aligned}$$

3-

Per  $V_B = 3V$ , la situazione e' l'opposta del punto 1. Il transistor M2 e' acceso ed il transistor M1 e' spento. Quindi tutta la corrente del transistor bipolare ( $I_C = 1mA$ ) scorre su M2. Analogamente al punto 1 si puo' calcolare  $V_{GS2}$  che risulta essere:

$$V_{GS2} = V_{TH} + \sqrt{\frac{I_C}{k}} = 1.5V + \sqrt{\frac{1mA}{2mA/V^2}} = 2.2071V$$

Ne segue che si ha che

$$V_X = 0 - V_{GS2} = -2.2071V$$

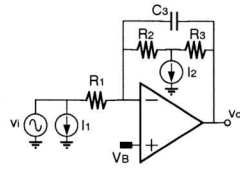
Per cio' che concerne il segnale, M2 opera da buffer di corrente. Il guadagno puo' essere quindi calcolato come quello di un emettitore comune e risulta quindi essere:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{s \cdot C_{IN} \cdot r_{\pi}}{1 + s \cdot C_{IN} \cdot r_{\pi}} \cdot g_m \cdot R_L$$

### Esercizio 3

L' amplificatore operazionale e' ideale.

- 1- Si calcoli il punto di lavoro;  $V_B=4V$
- 2- Si calcoli la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;  $I_1=I_2=1mA$
- 3- Si valuti l'andamento di  $v_o(t)$  in risposta ad un gradino in ingresso di  $10mV$ ;  $R_1=10k\Omega$
- 4- Si valuti la variazione della tensione di uscita per un offset di  $10mV$ ;  $R_2=R_3=2k\Omega$



1- In continua il generatore di segnale  $v_i$  viene spento e diventa un corto circuito. La corrente  $I_1$  scorre tutta dalla massa verso massa e quindi non ha alcun effetto. Si puo' poi utilizzare la sovrapposizione degli effetti per i vari generatori in continua, ricordando che si puo' trascurare l'effetto di  $C_3$  che in continua opera da circuito aperto. Applicando solo  $V_B$  e spegnendo  $I_2$  si ha che:

$$V_{o,VB} = V_B \cdot \left(1 + \frac{R_2+R_3}{R_1}\right) = 5.6V$$

Applicando solo  $I_2$  e spegnendo  $V_B$  si ha che:

$$V_{o,I2} = -I_2 R_3 = 2V$$

In totale si ottiene:

$$V_o = V_{o,VB} + V_{o,I2} = 7.6V$$

2-

Per il segnale si ottiene:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2+R_3}{R_1} \cdot \frac{1}{1+s \cdot C_3(R_2+R_3)} = -\frac{R_2+R_3}{R_1} \cdot \frac{1}{1+s \cdot C_3(R_2+R_3)}$$

3-

Il circuito presenta un funzione di trasferimento ad un solo polo e quindi in risposta ad un gradino si ha un andamento esponenziale

$$v_o(t) = -\frac{R_2+R_3}{R_1} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{C_3(R_2+R_3)}\right)\right) \cdot 10mV$$

4-

L'offset si sovrappone a  $V_B$  e quindi si puo' scrivere

$$V_{o,offset} = V_{offset} \cdot \left(1 + \frac{R_2+R_3}{R_1}\right) = 14mV$$

## Soluzioni

### Esercizio 1

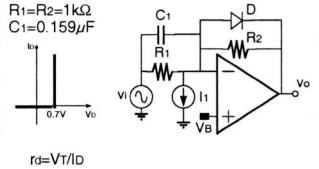
Il diodo ha la relazione I-V mostrata in figura. L'amplificatore e' ideale.

$$I_1=1mA$$

$$R_1=R_2=1k\Omega$$

$$C_1=0.159\mu F$$

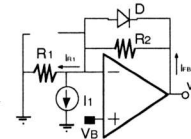
- 1- Per  $V_B=2V$ , si calcoli il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;
- 2- Per  $v_i(t)=1mV \cdot \sin(2\pi \cdot 100kHz \cdot t)$ , si tracci l'andamento della tensione  $v_o(t)$ ;
- 3- Per  $V_B=-5V$ , si calcoli il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;



$$r_d = V_T / I_D$$

1 -

Per la polarizzazione si puo' trascurare il generatore  $v_i$  (che e' di segnale).



Essendo la reazione chiusa attorno all'operazionale da  $R_2$ , si ha che l'ingresso invertente dell'amplificatore si porta a  $V_B=2V$ .

Attraverso  $R_1$  scorre una corrente che e':

$$I_{R1} = \frac{V_B - 0V}{R_1} = 2mA$$

Nel ramo in reazione scorre quindi una corrente che e':

$$I_{FB} = I_{R1} + I_1 = 3mA$$

Questa corrente e' opposta a quella che puo' essere accettata dal diodo che si trova quindi polarizzato in inversa. Tutta la corrente scorre quindi su  $R_2$  e l'uscita si porta quindi a:

$$V_o = V_B + I_{FB} \cdot R_2 = 5V$$

Per cio' che concerne il segnale, il diodo in inversa corrisponde ad un circuito aperto. Il guadagno di piccolo segnale si puo' allora facilmente scrivere come:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1 \parallel C_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1+s \cdot C_1 \cdot R_1}$$

2-

La funzione di trasferimento presenta uno zero alla frequenza:

$$f_z = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_1} = 1kHz$$

La frequenza del segnale di ingresso ( $100kHz$ ) e' due decadi superiore a quella dello zero. Cio' comporta che si abbia un'amplificazione di  $40dB$ . Il segnale viene quindi elaborato con un guadagno di  $100$  rispetto al valore in continua. Il guadagno in continua e':

$$\frac{v_o}{v_i}(0) = -\frac{R_2}{R_1} = -1$$

In totale in segnale in uscita e' una sinusoide a  $100kHz$  di ampiezza:

$$Ampiezza = 1mV \cdot 100 = 100mV$$

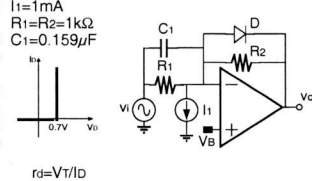
## Prova di Esame

25 Luglio 2000

### Esercizio 1

Il diodo ha la relazione I-V mostrata in figura. L'amplificatore e' ideale.

- 1- Per  $V_B=2V$ , si calcoli il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;
- 2- Per  $v_i(t)=1mV \cdot \sin(2\pi \cdot 100kHz \cdot t)$ , si tracci l'andamento della tensione  $v_o(t)$ ;
- 3- Per  $V_B=-5V$ , si calcoli il punto di lavoro e la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;



$$r_d = V_T / I_D$$

### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito;  $V_{DD}=10V$
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i(s)$  e se ne traccino i diagrammi di Bode;  $V_{SS}=-10V$
- 3- Si indichi il valore massimo di  $R_L$  per cui  $M_2$  sia ancora in saturazione;  $I_B=2mA$

$$R_{B1}=1k\Omega$$

$$R_{B2}=9k\Omega$$

$$R_L=2k\Omega$$

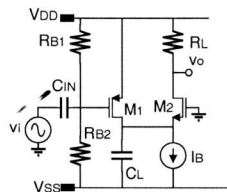
$$V_{TH1}=1V$$

$$V_{TH2}=1V$$

$$k_1=k_2=1mA/V^2$$

$$C_{IN}=\infty$$

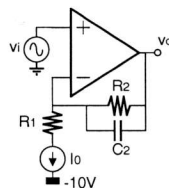
$$C_L=1nF$$



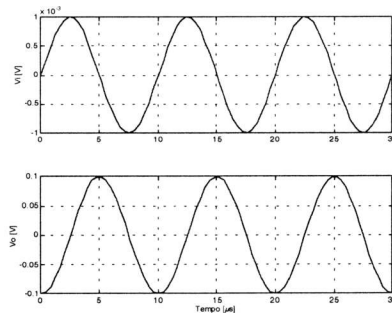
### Esercizio 3

L' amplificatore operazionale e' ideale.

- 1- Si calcoli il punto di lavoro;  $I_{O1}=1mA$
- 2- Si calcoli la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;  $R_1=5k\Omega$
- 3- Si valuti l'andamento di  $v_o(t)$  in risposta ad un gradino in ingresso di  $10mV$ ;  $R_2=2k\Omega$
- 4- Si valuti come varia la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$  assumendo un guadagno finito dell'operazionale  $A_o=100$ ;  $C_2=1nF$



Il segnale e' ben oltre lo zero e quindi ha uno sfasamento di  $+90^\circ$  rispetto al segnale in ingresso. In aggiunta c'e' anche uno sfasamento di  $-180^\circ$  dovuto al fatto che la funzione di trasferimento presenta un guadagno negativo.



3-

Per  $V_B=-5V$ , la corrente attraverso  $R_1$  e':

$$I_{R1} = \frac{V_B - 0V}{R_1} = -5mA$$

Nel ramo in reazione scorre quindi una corrente che e':

$$I_{FB} = I_{R1} + I_1 = -4mA$$

Questa corrente e' tale da polarizzare il diodo in diretta. La tensione sul diodo sara' dunque  $0.7V$ .

L'uscita si porta quindi a

$$V_o = V_B - V_D = -4.3V$$

Su  $R_2$  scorre una corrente che e':

$$I_{R2} = \frac{V_D}{R_2} = 0.7mA$$

La corrente del diodo e' quindi:

$$I_D = I_{FB} - I_{R2} = 3.3mA$$

Per cio' che concerne il segnale, il diodo in diretta corrisponde ad una resistenza di valore:

$$r_d = V_T / I_D = 25mV / 3.3mA = 7.6\Omega$$

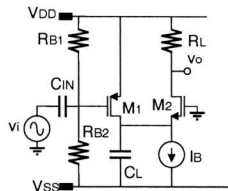
L'impedenza in reazione e' ora il parallelo di  $r_d$  e di  $R_2$ . Essendo  $r_d \ll R_2$ , l'impedenza in reazione e' sostanzialmente  $r_d$  e quindi la funzione di trasferimento risulta essere:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{r_d}{R_1 \parallel C_1} = -\frac{r_d}{R_1} \cdot \frac{1}{1+s \cdot C_1 \cdot R_1}$$

### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- Si calcoli il guadagno  $v_o/v_i(s)$  e se ne traccino i diagrammi di Bode
- 3- Si indichi il valore massimo di  $R_L$  per cui M2 sia ancora in saturazione

$V_{DD} = 10V$   
 $V_{SS} = -10V$   
 $I_B = 2mA$   
 $R_{B1} = 1k\Omega$   
 $R_{B2} = 9k\Omega$   
 $R_L = 2k\Omega$   
 $V_{TH1} = -1V$   
 $V_{TH2} = 1V$   
 $k_1 = k_2 = 1mA/V^2$   
 $C_{IN} \Rightarrow \infty$   
 $C_L = 1nF$



1-

La tensione di gate di M1 e' data dal partitore  $R_{B1}-R_{B2}$  ed e':

$$V_{G1} = V_{SS} + (V_{DD} - V_{SS}) \cdot \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 8V$$

Si ha quindi il livello di corrente in M1, supponendo che operi in saturazione:

$$I_{M1} = k_1 \cdot (V_{G1} - V_{TH1})^2 = 1mA$$

Applicando ora la legge di Kirchoff al nodo di drain di M1 si ottiene la corrente in M2:

$$I_{M2} = I_B - I_{M1} = 1mA$$

Supponendo che M2 operi in saturazione, si puo' ricavare la tensione  $V_{G2}$  che e':

$$V_{G2} = V_{TH2} + \sqrt{\frac{I_{M2}}{k_2}} = 2V$$

Ne segue che  $V_{S2} = V_{D1}$  e' data da:

$$V_{S2} = V_{D1} = V_{G2} - V_{G1} = -2V$$

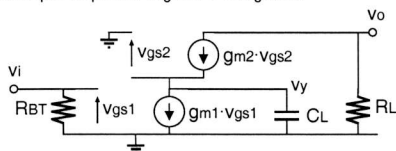
Si verifica quindi che M1 opera effettivamente in saturazione

La tensione sul nodo di uscita si porta a:

$$V_o = V_{DD} - I_{M2} \cdot R_L = 8V$$

2-

Il circuito equivalente per un piccolo segnale e' il seguente:



Si possono scrivere i bilanci di corrente al nodo di  $v_y$  e di  $v_o$ :

$$g_{m2} v_{gs2} = s C_L v_y + g_{m1} v_{gs1}$$

$$g_{m2} v_{gs2} + v_o/R_L = 0$$

Si osserva poi che:

$$v_{gs1} = v_i$$

$$v_{gs2} = -v_y$$

Sostituendo si ottiene:

$$g_{m2} (-v_y) = s C_L v_y + g_{m1} v_i$$

$$g_{m2} (-v_y) + v_o/R_L = 0$$

Risolviendo si ottiene:

$$v_y = \frac{v_o}{g_{m2} R_L}$$

$$g_{m2} \left( -\frac{v_o}{g_{m2} R_L} \right) - s C_L \frac{v_o}{g_{m2} R_L} = g_{m1} v_i$$

La funzione di trasferimento e' quindi:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_{m1} R_L}{1 + s C_L / g_{m2}}$$

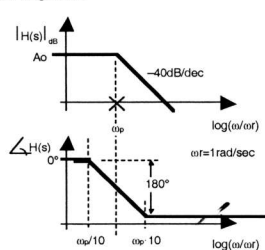
E' presente un polo a:

$$\omega_p = g_{m2} / C_L$$

Il guadagno in continua e':

$$A_o = g_{m1} R_L$$

I diagrammi di Bode sono i seguenti:



3-

La corrente su  $R_L$  e' di 1mA. Il transistor M2 rimane in saturazione finche':

$$V_{D2} \geq V_{G2} - V_{TH2}$$

Cio' si puo' riscrivere come:

$$V_{DD} - I_{M2} R_L \geq V_{G2} - V_{TH2}$$

Per cui si ha che:

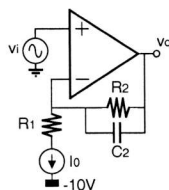
$$R_L \leq \frac{V_{DD} - V_{G2} + V_{TH2}}{I_{M2}} = 11k\Omega$$

### Esercizio 3

L' amplificatore operazionale e' ideale.

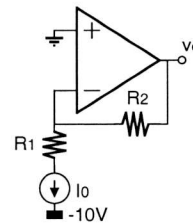
- 1- Si calcoli il punto di lavoro;
- 2- Si calcoli la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$ ;
- 3- Si valuti l'andamento di  $v_o(t)$  in risposta ad un gradino in ingresso di 10mV
- 4- Si valuti come varia la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$  assumendo un guadagno finito dell'operazionale  $A_o=100$

$I_o = 1mA$   
 $R_1 = 5k\Omega$   
 $R_2 = 2k\Omega$   
 $C_2 = 1nF$



1-

Per il punto di lavoro, si deve considerare il circuito seguente:

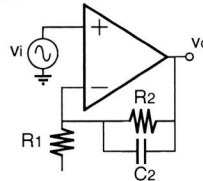


I due ingressi dell'operazionale sono a massa  
L'uscita si porta alla tensione:

$$V_o = R_2 \cdot I_o = 2V$$

2-

Per il segnale il circuito diventa:



La funzione di trasferimento e' quindi:

$$\frac{v_o}{v_i} = 1$$

3-

La risposta ad un gradino e' quindi ancora un gradino di uguale entita'.

4-

Nel caso di  $A_o=100$ , la funzione di trasferimento diventa

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{A_o}{1 + A_o}$$

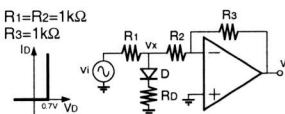
## Prova di Esame

13 Settembre 2000

### Esercizio 1

Il diodo e' ideale con la relazione I-V mostrata in figura.

- 1- Per  $R_D=0\Omega$ , si tracci l'andamento della tensione  $v_o(t)$  per  $v_i(t)=2V \cdot \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$  e si indichi quando il diodo e' acceso e quando e' spento;
- 2- Per  $R_D=0\Omega$  e per  $v_i(t)=2V \cdot \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$ , si calcoli il valore massimo di  $R_2$  (ed il valore conseguente di  $R_1$ ) in modo tale che a pari guadagno in uscita, il diodo non si accenda mai;
- 3- Per  $R_D=1k\Omega$ , si tracci l'andamento della tensione  $v_o(t)$  per  $v_i(t)=2V \cdot \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$ ;



### Esercizio 2

1- Si valuti il punto di lavoro

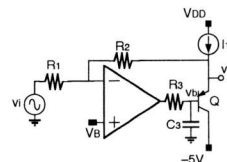
del circuito

2- Si ignori l'effetto di  $C_3$  e si calcoli il guadagno  $v_o/v_i(s)$ ;

3- Considerando l'effetto di  $C_3$ , si calcoli il guadagno  $v_o/v_i(s)$ ;

$\beta \Rightarrow \infty$

$C_3 \Rightarrow \infty$



### Esercizio 3

L' amplificatore operazionale e' ideale,  $I_1=1mA$

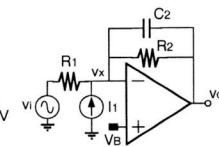
a parte i livelli di saturazione indicati.

1- Si calcoli il punto di lavoro;

2- Si dimensioni  $I_1$  in modo da portare  $V_o=0V$  in polarizzazione;

3- Si calcoli la funzione di trasferimento  $v_o/v_i(s)$  e se ne traccino i diagrammi di Bode;

4- Si valuti l'andamento di  $v_o(t)$  in risposta a  $v_i(t)=2V \cdot \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$ ;



## Soluzioni

### Esercizio 1

Il diodo e' ideale con la relazione I-V mostrata in figura.

- 1- Per  $R_D=0\Omega$ , si tracci l'andamento della tensione  $v_o(t)$  per  $v_i(t)=2V \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$  e si indichi quando il diodo e' acceso e quando e' spento;
- 2- Per  $R_D=0\Omega$  e per  $v_i(t)=2V \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$ , si calcoli il valore massimo di  $R_2$  (ed il valore conseguente di  $R_1$ ) in modo tale che a pari guadagno in uscita, il diodo non si accenda mai;
- 3- Per  $R_D=1k\Omega$ , si tracci l'andamento della tensione  $v_o(t)$  per  $v_i(t)=2V \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$ ;

1- L'amplificatore operazionale lavora sempre ad anello chiuso in quanto la reazione attraverso  $R_3$  e' sempre attiva. E' quindi sempre valido il principio di massa virtuale ed il suo ingresso invertente e' sempre a potenziale nullo. Si deve ora valutare se e quando il diodo e' acceso.

Per  $V_x < 0.7V$ , il diodo e' spento. Essendo  $V_x$  (nel caso di diodo spento) dato da:

$$V_x = V_i \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_i}{2}$$

il diodo risulta spento per  $V_i < 1.4V$ .

Per  $V_i > 1.4V$ ,  $V_x$  risulterebbe maggiore di  $0.7V$  e quindi il diodo e' acceso e  $V_x$  in realta' e' bloccato a  $0.7V$ .

Noto l'andamento di  $V_x$  e' quindi possibile valutare l'andamento di  $V_o$ . Infatti  $V_o$  e' sempre dato da:

$$V_o = -\frac{R_3}{R_2} \cdot V_x = -V_x$$

Ne risulta alla fine che:

per  $V_i < 1.4V$  il diodo e' spento,  $V_x = \frac{V_i}{2}$ ,  $V_o = -V_x = -\frac{V_i}{2}$

per  $V_i > 1.4V$  il diodo e' acceso,  $V_x = 0.7V$ ,  $V_o = -V_x = -0.7V$

- 2- Per  $R_D=0\Omega$  e per  $v_i(t)=1V \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$ , si dimensioni  $R_2$  in modo tale che a pari guadagno in uscita, il diodo non si accenda mai;

Quando il diodo e' spento, e' come se non ci fosse. Il guadagno e' quindi:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_3}{R_1 + R_2}$$

Per avere guadagno costante al variare di  $R_2$  e' quindi necessario mantenere costante la somma  $(R_1 + R_2) = 2k\Omega$  e quindi aggiornare anche  $R_1 = 2k\Omega - R_2$ .

Il diodo non si accende mai se  $V_x < 0.7$ .

Cio' deve accadere per il valore massimo del segnale che e'  $2V$ .

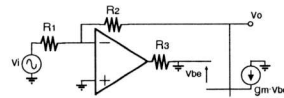
Quindi deve essere:

$$V_x = 2V \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 0.7$$

Sapendo che deve essere  $(R_1 + R_2) = 2k\Omega$ , si ricava subito  $R_2$  che e':

$$R_2 < \frac{0.7}{2} \cdot (R_1 + R_2) = 350\Omega$$

In questo modo il diodo non si accende mai e non si ha piu' l'effetto di clamping che si aveva al punto 1.



La presenza del condensatore apre l'anello di reazione che, quindi, non e' piu' attivo. Non vale piu' il principio di massa virtuale.

Si scrive allora il bilancio di corrente al nodo  $v_o$  che risulta:

$$\frac{v_i - v_o}{R_1 + R_2} = -g_m \cdot v_{be} = -g_m \cdot (0 - v_o)$$

Risolviendo per  $v_o$  si ottiene:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{1 + g_m(R_1 + R_2)}$$

### Esercizio 3

L' amplificatore operazionale e' ideale,  $I_1 = 1mA$

a parte i livelli di saturazione indicati.  $V_B = 3.5V$

1- Si calcoli il punto di lavoro;  $R_1 = 5k\Omega$

2- Si dimensioni  $I_1$  in modo da portare  $R_2 = 20k\Omega$

$V_o = 0V$  in polarizzazione;  $C_2 = 1nF$

3- Si calcoli la funzione di  $V_{SAT} = 5V$

trasferimento  $v_o/v_i(s)$  e se ne traccino i  $V_{SAT} = -5V$

diagrammi di Bode;

4- Si valuti l'andamento di  $v_o(t)$  in

risposta a  $v_i(t) = 2V \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$ ;

1-

Per il punto di lavoro si trascura il condensatore  $C_2$ .

Si scrive allora l'equazione di Kirchhoff al nodo  $v_x$ :

$$\frac{v_x}{R_1} = I_1 + \frac{v_o - v_x}{R_2}$$

Si ha poi per il principio di massa virtuale  $v_x = V_B$ . Ne deriva che:

$$\frac{V_B}{R_1} = I_1 + \frac{v_o - V_B}{R_2}$$

Ne segue che si ha:

$$v_o = R_2 \cdot \left( \frac{V_B}{R_1} - I_1 + \frac{V_B}{R_2} \right) = -2.5V$$

2-

Per avere  $v_o = 0V$ , si deve avere:

$$I_1 = \frac{V_B}{R_1} + \frac{V_B}{R_2} = 0.87mA$$

3-

Il guadagno di piccolo segnale e' dato da:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{1 + sR_2C_2} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + sR_2C_2}$$

La funzione di trasferimento e' caratterizzata dai seguenti parametri:

### Esercizio 2

1- Si valuti il punto di lavoro  $V_{DD} = 10V$

del circuito  $I_1 = 2mA$

2- Si ignori l'effetto di  $C_3$  e si

calcoli il guadagno  $v_o/v_i(s)$ ;  $V_B = 3V$

3- Considerando l'effetto di

$C_3$ , si calcoli il guadagno

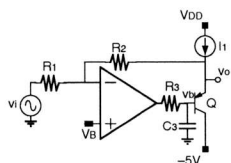
$v_o/v_i(s)$ ;  $R_1 = 6k\Omega$

$R_2 = 6k\Omega$

$R_3 = 6k\Omega$

$\beta \gg \infty$

$C_3 \gg \infty$



1- Per calcolare il punto di lavoro, si spegne il generatore di segnale  $v_i$ . La resistenza  $R_1$  risulta quindi connessa a massa.

Si supponga quindi la reazione chiusa (con cioe' il transistor Q operante in regione attiva). Vale allora il principio di massa virtuale e l'ingresso invertente dell'amplificatore si porta a  $V_B$ .

Attraverso  $R_1$  scorre quindi una corrente pari a:

$$I_{R1} = \frac{V_B}{R_1} = 0.5mA$$

Questa corrente arriva da  $R_2$ . Il nodo di uscita si porta quindi a:

$$V_o = V_B + I_{R1} \cdot R_2 = 6V$$

La corrente  $I_1$  si divide poi in due parti: una parte scorre sul ramo  $R_2 - R_1$  e l'altra scorre attraverso il transistor Q, nella misura di:

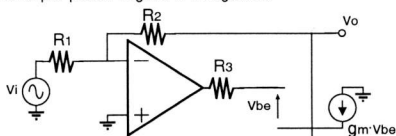
$$I_Q = I_1 - I_{R1} = 1.5mA$$

Supponendo il transistor in regione attiva, la sua base si porta alla tensione:

$$V_{base} = V_o - V_{EB} = 5.3V.$$

2-

Il circuito equivalente per piccoli segnali e' il seguente:



Nel circuito non e' presente la resistenza  $r_{\pi}$  in quanto si ha che  $\beta \gg \infty$ . Inoltre il valore di  $g_m$  e':

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1.5mA}{25mV} = 60mA/V$$

Essendo la reazione chiusa, vale il principio di massa virtuale e dalla legge di Kirchhoff al nodo di massa virtuale si ha subito che:

$$\frac{v_i}{R_1} = \frac{-v_o}{R_2}$$

Per cui si ottiene:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

3-

Considerando anche il condensatore  $C_3$  (che opera da corto circuito) il circuito equivalente per piccoli segnali e' il seguente:

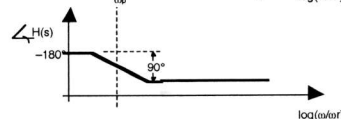
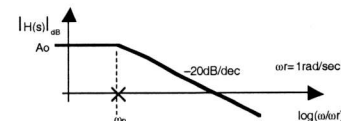
Guadagno in continua

$$A_o = \frac{R_2}{R_1} = 4 = 12dB$$

Posizione del polo

$$\omega_p = \frac{1}{C_2 \cdot R_2} = 50krad/sec = 8kHz$$

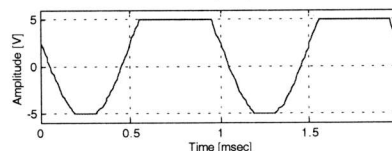
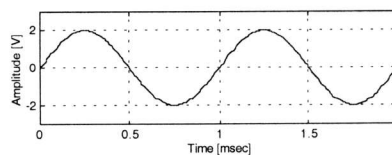
I diagrammi di Bode sono i seguenti:



4-

Il segnale in ingresso e' ad una frequenza che e' circa 8 volte inferiore a quella del polo. Se ne deduce che il guadagno che il circuito presenta a quella frequenza e' praticamente uguale al guadagno in continua (4, cioe' 12dB).

Il segnale di 2V viene quindi amplificato ed arriva all'uscita come sinusoide di 8V di ampiezza centrata attorno al punto di polarizzazione di -2.5V. La forma d'onda che ne risulta e' la seguente:





## Corso di Elettronica

prof. Andrea Baschirotto  
a.a. 2002/2003

### Prova Scritta

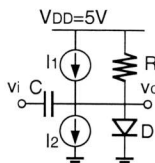
30 Giugno 2003

Cognome e Nome	Matricola	Voto

#### Esercizio 1

Nel circuito il diodo presenta una  $V_T=0.7V$ ,  
 $R=1k\Omega$ ,  $C=5.3nF$ ,  $I_2=2mA$

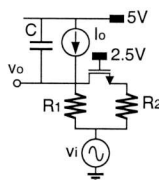
- 1- Si tracci l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $I_1$  compreso tra 0 e 4mA;
- 2- Per  $I_1=1mA$ , si calcoli la funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$
- 3- Si determini il valore di  $I_1$  per cui il polo della funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$  e' a 1MHz



#### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- si calcoli il guadagno di piccolo segnale  $v_o/v_i$ ;
- 3- si traccino i diagrammi di Bode di  $v_o/v_i$ .

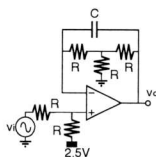
$I_0=2mA$   
 $R_2=500k\Omega$   
 $R_1=3K\Omega$   
 $K=1mA/V^2$   
 $V_{TH}=1V$   
 $C=10pF$



#### Esercizio 3 - vo

L'amplificatore operazionale e' ideale. Inoltre  
 $R=10k\Omega$ , e  $C=1nF$

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- si calcoli il guadagno di piccolo segnale  $v_o/v_i$ ;
- 3- si traccino i diagrammi di Bode



Verranno corrette solo le parti scritte in penna (non quelle scritte a matita).



## Corso di Elettronica Analogica I

prof. Andrea Baschirotto  
a.a. 2002/2003

### Prova Scritta

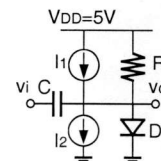
30 Giugno 2003

Cognome e Nome	Matricola	Voto

#### Esercizio 1

Nel circuito il diodo presenta una  $V_T=0.7V$ ,  
 $R=1k\Omega$ ,  $C=5.3nF$ ,  $I_2=2mA$

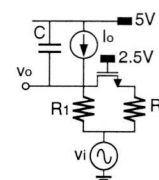
- 1- Si tracci l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $I_1$  compreso tra 0 e 4mA;
- 2- Per  $I_1=1mA$ , si calcoli la funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$
- 3- Si determini il valore di  $I_1$  per cui il polo della funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$  e' a 1MHz



#### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- si calcoli il guadagno di piccolo segnale  $v_o/v_i$ ;
- 3- si traccino i diagrammi di Bode di  $v_o/v_i$ .

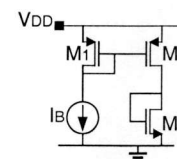
$I_0=2mA$   
 $R_2=500k\Omega$   
 $R_1=3K\Omega$   
 $K=1mA/V^2$   
 $V_{TH}=1V$   
 $C=10pF$



#### Esercizio 3 - no

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- si valuti per che valori di  $V_{DD}$  tutti i transistor operano in regione di saturazione;

$I_B=1.5mA$   
 $K_1=K_2=1mA/V^2$   
 $V_{TH1}=V_{TH2}=1V$   
 $K_3=1mA/V^2$   
 $V_{TH3}=2.5V$   
 $V_{DD}=5V$



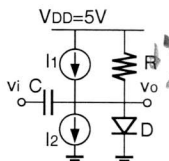
Verranno corrette solo le parti scritte in penna (non quelle scritte a matita).

## Soluzioni

#### Esercizio 1

Nel circuito il diodo presenta una  $V_T=0.7V$ ,  
 $R=1k\Omega$ ,  $C=5.3nF$ ,  $I_2=2mA$

- 1- Si tracci l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $I_1$  compreso tra 0 e 4mA;
- 2- Per  $I_1=1mA$ , si calcoli la funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$
- 3- Si determini il valore di  $I_1$  per cui il polo della funzione di trasferimento di piccolo segnale  $v_o/v_i$  e' a 1MHz



- 1- Per  $I_1 < I_2 = 2mA$ , D OFF e

$$V_o = V_{DD} - R \cdot (I_2 - I_1)$$

- Per  $I_1 > I_2 = 2mA$ , D ON e

$$V_o = V_T = 0.7V$$

- 2-

- Per  $I_1 = 1mA$ , D OFF e

$$v_o/v_i = sRC / (1 + sRC)$$

- 3-

La resistenza deve essere di  $30\Omega$ .

Con il diodo acceso, la corrente deve essere

$$r_D = V_T/I_D = 30\Omega$$

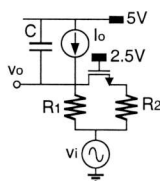
$$I_D = V_T/r_D = 0.833mA$$

$$I_1 = I_D + I_2 = 2.833mA$$

#### Esercizio 2

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- si calcoli il guadagno di piccolo segnale  $v_o/v_i$ ;
- 3- si traccino i diagrammi di Bode di  $v_o/v_i$ .

$I_0=2mA$   
 $R_2=500k\Omega$   
 $R_1=3K\Omega$   
 $K=1mA/V^2$   
 $V_{TH}=1V$   
 $C=10pF$



- 1-

$$I_M = 1mA$$

$$V_{GS} = 2V$$

$$V_{R2} = 0.5mA$$

$$I_{R1} = 1mA$$

$$V_o = 3V$$

- 2-

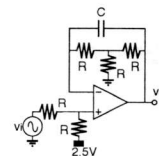
$$v_o/v_i = (1 + (g_m R_2)/(1 + g_m R_1)) \cdot (1/(1 + sRC))$$

$$1 + \frac{g_m R_2}{1 + g_m R_1} = \frac{1 + g_m R_2 + g_m R_1}{1 + g_m R_1}$$

#### Esercizio 3 - vo

L'amplificatore operazionale e' ideale. Inoltre  
 $R=10k\Omega$ , e  $C=1nF$

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- si calcoli il guadagno di piccolo segnale  $v_o/v_i$ ;
- 3- si traccino i diagrammi di Bode



- 1-

$$v_+ = 1.25V = v_-$$

$$v_x = 1.25V$$

$$v_o = 2.5V$$

- 2-

$$v_o/v_i = 1/2$$

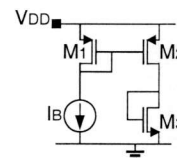
$$v_o/v_+ = (2 + 3sRC)/(1 + 3sRC)$$

$$v_o/v_i = (2 + 3sRC)/(2 + 6sRC)$$

#### Esercizio 3 - no

- 1- Si valuti il punto di lavoro del circuito
- 2- si valuti per che valori di  $V_{DD}$  tutti i transistor operano in regione di saturazione;

$I_B=1.5mA$   
 $K_1=K_2=1mA/V^2$   
 $V_{TH1}=V_{TH2}=1V$   
 $K_3=1mA/V^2$   
 $V_{TH3}=2.5V$   
 $V_{DD}=5V$



- 1-

$$I_{M1} = I_{M2} = I_B = 1.5mA$$

$$I_{M3} = 1.5mA$$

$$V_{DS3} = V_{GS3} = V_{TH3} + \sqrt{(I_{M3}/K_3)} = 3.725V$$

- 2-

M2 in saturazione per  $V_{DS2}=1V$

$$V_{DDmin} = 3.725V + 1V = 4.725V$$

**Prova Scritta**  
5 Settembre 2003

Cognome e Nome	Matricola	Voto

- Esercizio 1**  
Nel circuito  $R=1k\Omega$ ,  $C=5.3nF$   
1- Si valuti il punto di lavoro del  
circuitino.  
2- Per  $V_i=0.7V$  e  $I_{BQ}=1mA$ , si tracci  
l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $V_i$   
compresso tra  $-10V$  e  $10V$ .  
3- Per  $V_i=0.7V$  e  $I_{BQ}=1mA$ , si tracci  
l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $V_i$   
compresso tra  $-10V$  e  $10V$ .

- Esercizio 2**  
1- Si valuti il punto di lavoro del  
circuitino.  
2- Si calcoli il guadagno di piccolo  
segnale  $v_{ov}$ .  
3- Si traccino i diagrammi di Bode di  
 $v_{ov}$ .

- Esercizio 3 - vo**  
1- Si valuti il punto di lavoro del  
circuitino.  
2- Si calcoli il guadagno di piccolo  
segnale  $v_{ov}$ .  
3- Si valuti di quanto cambia la  
tensione di polarizzazione del  
nodo di uscita per un guadagno  
infinito dell'amplificatore  
operazionale.

Verranno corrette solo le parti scritte in penna (non quelle scritte a matita).

- 2-  $I_{BQ}=0.8mA$   
 $I_D=14\mu A$   
 $v_{ov}=-gm(R_C/D/C)=0.118/(1+sRC) (RC/D)$

3-

- Esercizio 3 - vo**  
1- Si valuti il punto di lavoro del  
circuitino.  
2- Si calcoli il guadagno di piccolo  
segnale  $v_{ov}$ .  
3- Si valuti di quanto cambia la  
tensione di polarizzazione del  
nodo di uscita per un guadagno  
infinito dell'amplificatore  
operazionale.

- 1-  
 $V_i=V_o/A_o$   
 $V_i-V_o=V_o-V_o$

$V_{ov}=2.9189V$

2-

- 3-  
 $V_{ov}=3.5V$   
 $D/C=0.5854V$

- Esercizio 3 - no**  
1- Si valuti il punto di lavoro del  
circuitino.  
2- Si calcoli il guadagno di piccolo  
segnale  $v_{ov}$ .  
3- Si traccino i diagrammi di Bode di  
 $v_{ov}$ .

- 1-  
Si scrivono le equazioni  
 $I_{BQ}=I_{BQ}$   
 $I_{BQ}=I_{BQ}$   
 $I_{BQ}=I_{BQ}$   
 $V_i=V_o/V_i$   
 $V_i=V_o/V_i$



**Prova Scritta**  
5 Settembre 2003

Cognome e Nome	Matricola	Voto

- Esercizio 1**  
Nel circuito  $R=1k\Omega$ ,  $C=5.3nF$   
4- Per  $V_i=0.7V$  e  $I_{BQ}=1mA$ , si tracci  
l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $V_i$   
compresso tra  $-10V$  e  $10V$ .  
5- Per  $V_i=0.7V$  e  $I_{BQ}=1mA$ , si tracci  
l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $V_i$   
compresso tra  $-10V$  e  $10V$ .  
6- Per  $V_i=0.7V$  e  $I_{BQ}=1mA$ , si tracci  
l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $V_i$   
compresso tra  $-10V$  e  $10V$ .

- Esercizio 2**  
1- Si valuti il punto di lavoro del  
circuitino.  
2- Si calcoli il guadagno di piccolo  
segnale  $v_{ov}$ .  
3- Si traccino i diagrammi di Bode di  
 $v_{ov}$ .

- Esercizio 3 - no**  
1- Si valuti il punto di lavoro del  
circuitino.  
2- Si calcoli il guadagno di piccolo  
segnale  $v_{ov}$ .  
3- Si traccino i diagrammi di Bode di  
 $v_{ov}$ .

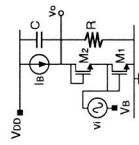
Verranno corrette solo le parti scritte in penna (non quelle scritte a matita).

Risolvendo per  $V_{ov}$  si ottengono due valori:  
 $V_{ov} = (1.78V, -0.28V)$

Il primo è corretto. Da cui si ricava

$V_{ov} = 1.78V$   
 $I_{BQ} = 0.8mA$   
 $I_{DQ} = 1.4mA$   
 $V_{ov} = 2.78V$

2-



$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{1+sR \cdot C} \cdot \frac{1}{1+sR \cdot C \cdot \frac{1}{g_m}}$$

**Soluzioni**

- Esercizio 1**  
Nel circuito  $R=1k\Omega$ ,  $C=5.3nF$   
7- Per  $V_i=0.7V$  e  $I_{BQ}=1mA$ , si tracci  
l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $V_i$   
compresso tra  $-10V$  e  $10V$ .  
8- Per  $V_i=0.7V$  e  $I_{BQ}=1mA$ , si tracci  
l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $V_i$   
compresso tra  $-10V$  e  $10V$ .  
9- Per  $V_i=0.7V$  e  $I_{BQ}=1mA$ , si tracci  
l'andamento di  $V_o$  in funzione di  $V_i$   
compresso tra  $-10V$  e  $10V$ .  
1- Per  $V_i=0.7V$ ,  $D1$  e  $D2$  OFF,  $V_{o1}=0V$ ,  $V_{o2}=5V$   
Per  $V_i=0.7V$ ,  $D1$  ON e  $D2$  OFF,  $V_{o1}=V_i$ ,  $V_{o2}=5V$   
Per  $V_i=0.7V$ ,  $D1$  ON e  $D2$  ON,  $V_{o1}=V_i$ ,  $V_{o2}=V_i$

- 2- Per  $V_i=0.7V$ ,  $D1$  e  $D2$  OFF,  $V_{o1}=0V$ ,  $V_{o2}=5V$   
Per  $V_i=0.7V$ ,  $D1$  ON e  $D2$  OFF,  $V_{o1}=V_i$ ,  $V_{o2}=5V$   
Per  $V_i=0.7V$ ,  $D1$  ON e  $D2$  ON,  $V_{o1}=V_i$ ,  $V_{o2}=V_i$

- 3- Per  $V_i=0.7V$ ,  $D1$  e  $D2$  OFF,  $V_{o1}=0V$ ,  $V_{o2}=4V$   
Per  $V_i=0.7V$ ,  $D1$  ON e  $D2$  OFF,  $V_{o1}=V_i$ ,  $V_{o2}=4V$   
Per  $V_i=0.7V$ ,  $D1$  ON e  $D2$  ON,  $V_{o1}=V_i$ ,  $V_{o2}=V_i$

- Esercizio 2**  
1- Si valuti il punto di lavoro del  
circuitino.  
2- Si calcoli il guadagno di piccolo  
segnale  $v_{ov}$ .  
3- Si traccino i diagrammi di Bode di  
 $v_{ov}$ .

$I_{BQ} = (5V - 0.7V)/2k\Omega = 2.15\mu A$   
 $I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 0.215mA$   
 $D$  ON  
 $V_{ov} = 5V$   
 $I_{BQ} = (5V - 3V)/R_C = 2mA$   
 $I_D = I_{BQ} - I_{CQ} = 1.785mA$

